



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC**  
**CENTRO TECNOLÓGICO – CTC**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E DE ALIMENTOS - EQA**

**JESSICA DAIANE DOMINGOS**

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE *CHIPS* DE  
BATATAS-DOCE DESIDRATADOS POR MICRO-ONDAS A VÁCUO**

Florianópolis

2018



Jessica Daiane Domingos

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE CHIPS DE  
BATATAS-DOCE DURANTE A SECAGEM POR MICRO-ONDAS A VÁCUO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia de Alimentos da Universidade  
Federal de Santa Catarina como requisito parcial à  
obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Alimentos.  
Orientador: Prof. Dr. Bruno A. M. Carciofi  
Co-orientador: Dr. Ricardo Lemos Monteiro

Florianópolis

2018



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao professor Bruno, pela orientação deste trabalho e pela oportunidade de aprendizado como bolsista de iniciação científica desde o início da minha formação acadêmica.

Agradeço imensamente ao meu co-orientador Ricardo, que considero um grande amigo, por todo auxílio e orientação, oferecendo suporte e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos alunos de Iniciação Científica que colaboraram na execução dos experimentos: Ana Lúcia, Ísis e Guilherme.

Agradeço também todos os colegas do PROFI, que contribuíram para o meu crescimento e aprendizado durante todos esses anos.

Agradeço aos meus amigos e familiares, por sempre oferecerem suporte e incentivo nesta jornada acadêmica.

E, por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, muito obrigada!



## RESUMO

O processo de urbanização e a rotina das grandes cidades está alterando o estilo de vida do consumidor, tornando a busca por alimentos práticos e saudáveis uma tendência atual. Para a manutenção de uma dieta saudável, consumo de hortaliças é fortemente incentivado por profissionais da nutrição. Dentre as hortaliças, a batata-doce destaca-se devido ao seu excelente perfil nutritivo, sendo rica em vitaminas e fibras. Porém, trata-se de um produto perecível devido à deterioração microbiana, sendo o processamento industrial necessário para a preservação de sua vida útil. Neste contexto, o presente trabalho avalia a secagem de batata-doce por micro-ondas a vácuo, objetivando a produção de *chips* de batata-doce crocantes isentos de óleo. As amostras de batata-doce *in natura* foram selecionadas, descascadas, fatiadas, branqueadas e desidratadas em micro-ondas doméstico adaptado com vácuo e sistema rotativo. As propriedades físico-químicas como umidade, atividade de água, estereoscopia, porosidade, massa específica aparente, propriedades mecânicas, cor e propriedades dielétricas foram avaliadas durante a secagem. As amostras branqueadas apresentaram valores de umidade em base úmida (bu) e atividade de água de aproximadamente 81% e 0,994, respectivamente. Após 27 min de secagem as amostras apresentaram umidade de 2,7% (bu) e atividade de água de 0,262. As amostras desidratadas apresentaram elevada porosidade (67,5%) e baixa massa específica aparente ( $0,456 \text{ g cm}^{-3}$ ). Com o auxílio de imagens capturadas pelo estereoscópio óptico e através das propriedades mecânicas realizadas por meio de teste de penetração, foi possível identificar uma estrutura com grandes poros, quebradiça e crocante. As análises de cor indicaram pouca variação entre as amostras *in natura* e secas por micro-ondas a vácuo, conservando a coloração clara e uniforme, com ausência de pontos queimados. Foi possível observar também a diminuição das propriedades dielétricas das amostras de batata-doce durante a secagem em relação ao teor de umidade e à frequência empregada. Sendo assim, a secagem por micro-ondas a vácuo mostra-se como uma alternativa interessante para a produção de *chips* de batata-doce altamente porosos e crocantes, estendendo a vida útil do produto e agregando valor.

**Palavras-chave:** secagem, batata-doce, micro-ondas, vácuo, propriedades dielétricas





## ABSTRACT

The urbanization process and the big cities routine is currently changing the consumer's lifestyle, since the search for practical and nutritive meals is becoming a worldwide tendency. In order to maintain a healthy diet, vegetables consumption is largely encouraged for nutrition professionals. Among the most known vegetables, sweet potatoes attract attention due to its superior nutritional characteristics, being rich in fibers and vitamins. However, sweet potatoes are highly perishable due to microbiological deterioration, requiring industrial processing to extend its shelf life. Therefore, this project evaluates sweet potato chips production through microwave vacuum drying, in order to achieve a crunchy and oil-free product. *In natura* sweet potato samples were selected, peeled, sliced, boiled and then dehydrated using a domestic microwave adapted with a vacuum chamber and a rotation system. Physicochemical properties such as moisture content, water activity, microstructure, porosity, apparent density, color and dielectric properties were evaluated for the drying process. Boiled samples showed moisture content in wet basis of 81% and 0,994 for water activity. After being submitted to a 27 min microwave vacuum drying process, the moisture content of the sweet potato samples decreased to 2,7%, while the water activity decreased to 0,262. The dehydrated samples showed high porosity values (67,5%) and low apparent density ( $0,456 \text{ g cm}^{-3}$ ). Evaluating the pictures captured by stereoscopy and through the mechanical properties determined using a penetration test, it was possible to identify a highly porous structure, with a brittle and crunchy matrix. The colorimetric analysis indicated little change between the *in natura* and the microwave vacuum dried samples, with absence of burnt spots. Furthermore, it was possible to notice the dielectric properties decrease in consequence of the sample's moisture content reduction. In conclusion, microwave vacuum drying is an interesting alternative for highly porous sweet potato chips production, aggregating value and extending the vegetable's shelf life.

**Keywords:** drying, sweet potato, microwave, vacuum, dielectric properties.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Velocidade relativa de reações em função da atividade de água.....	19
<b>Figura 2</b> - Tipos de isoterma de sorção .....	20
<b>Figura 3</b> - Curvas típicas de secagem.....	21
<b>Figura 4</b> - Representação esquemática de um magnetron (gerador de ondas eletromagnéticas em aparelhos de micro-ondas).....	24
<b>Figura 5</b> - Ilustração de uma onda eletromagnética plana, onde $E$ e $H$ são o campo elétrico e eletromagnético, sendo $E$ e $H$ suas respectivas amplitudes. ....	25
<b>Figura 6</b> - Batatas-doces ( <i>Ipomoea batatas</i> L. Lam,) utilizadas nas análises.....	30
<b>Figura 7</b> - Esquema micro-ondas a vácuo .....	31
<b>Figura 8</b> - Picnômetro de ar comprimido .....	34
<b>Figura 9</b> - Analisador vetorial de rede de mão RF FieldFox.....	38
<b>Figura 10</b> - Sonda para medição de propriedades dielétricas e bloco de calibração ( <i>High temperature short block</i> ). ....	38
<b>Figura 11</b> - Evolução temporal umidade média em base seca das amostras de batata-doce durante o processo de secagem em micro-ondas a vácuo. ....	42
<b>Figura 12</b> - Evolução temporal da média da atividade de água das amostras de batata-doce durante o processo de secagem por micro-ondas a vácuo. ....	42
<b>Figura 13</b> - Evolução temporal da temperatura das amostras e da potência (—) aplicada durante a secagem.....	42
<b>Figura 14</b> - Imagens obtidas por microscopia óptica da estrutura interna (fratura) de amostras de batata-doce desidratada por micro-ondas a vácuo. ....	43
<b>Figura 15</b> - Curvas força-deformação das amostras de batata-doce (a) <i>in natura</i> ; (b) branqueadas e submetidas ao processo de secagem por micro-ondas a vácuo por (c) 2 minutos; (d) 4 minutos; (e) 6 minutos; (f) 8 minutos; (g) 10 minutos; (h) 12 minutos e; (i) 27 minutos. ....	44
<b>Figura 16</b> - Evolução temporal (a) da porosidade e (b) da massa específica aparente das amostras de batata-doce durante o processo de secagem por micro-ondas a vácuo.....	46
<b>Figura 17</b> - Fotografia das batatas retiradas em diferentes estágios de secagem por MWVD. Amostras: (1) <i>In natura</i> , (2) branqueada, (3) 2 min, (4) 4 min, (5) 6 min, (6) 8 min, (7) 10 min, (8) 2 min, (9) 27 min. ....	47

**Figura 18** - Isotermas de sorção das batata-doce desidratadas por micro-ondas a vácuo. Dados experimentais (●). O modelo de GAB ajustado a curva está representado por linha contínua.

.....49

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Atividade de água das soluções salinas saturadas a temperatura de 25°C .....	37
<b>Tabela 2</b> - Atividade de água de soluções salinas saturadas a temperatura de 25 °C acondicionadas para realização das propriedades dielétricas. ....	39
<b>Tabela 3</b> - Valores médios e desvio-padrão dos resultados experimentais para umidade em base seca ( $X_{bs}$ ), em base úmida ( $X_{bu}$ ) e atividade de água ( $a_w$ ) de amostras de batata-doce.....	41
<b>Tabela 4</b> - Parâmetros de cor ( $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ , $\Delta E^*$ ) da batata-doce <i>in natura</i> , branqueadas e das batatas-doces durante a secagem por MWVD. ....	47
<b>Tabela 5</b> - Umidades de equilíbrio das amostras de batata-doce desidratadas acondicionadas em diferentes umidades relativas.....	48
<b>Tabela 6</b> - Parâmetros estimados do modelo de GAB ajustado aos dados experimentais de sorção de água da batata-doce seca por micro-ondas a vácuo.....	49
<b>Tabela 7</b> - Propriedade dielétricas e profundidade de penetração das micro-ondas da água, das batatas <i>in natura</i> , branqueada e secas em pó e acondicionada em soluções salinas de diferentes umidades relativas, nas frequências de 915 e 2450 MHz. Atividade de água ( $a_w$ ) e umidade em base úmida ( $X_{bu}$ ) das amostras. ....	52



**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

<b>Abreviaturas e Siglas</b>	<b>Descrição</b>
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
SC	Santa Catarina
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UV	Ultravioleta





## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
$a^*$	Tonalidade vermelha/verde	—
$a_w$	Atividade de água	—
$b^*$	Tonalidade amarela/azul	—
$c$	Velocidade da luz no vácuo	$\text{m s}^{-1}$
$C$	Constante de Guggenheim	—
$c_p$	Calor específico	$\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
$D$	Diâmetro das fatias de batata-doce	Mm
$dp$	Profundidade de penetração das micro-ondas	—
$dX/dt$	Taxa de secagem	$\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$
$\Delta E^*$	Variação total da cor	—
$e$	Número de Euler	—
$E$	Campo elétrico	$\text{V m}^{-1}$
$\varepsilon'$	Constante dielétrica	$\text{F m}^{-1}$
$\varepsilon''$	Constante de perda	—
$\varepsilon^*$	Permissividade relativa	—
$f$	Frequência	Hz
$K$	Constante do modelo de GAB	—
$L^*$	Luminosidade entre o branco e o preto	—
$m$	Massa	G
$p$	Nível de significância	—
$P$	Pressão	Mbar
$P_{atm}$	Pressão atmosférica	Mbar
$P_v$	Potência dissipada	$\text{W m}^{-3}$
$P_{vácuo}$	Pressão de vácuo	Mbar
$\rho_b$	Densidade aparente	$\text{g cm}^{-3}$
$\rho_p$	Densidade real	$\text{g cm}^{-3}$
$\rho_p$	Densidade real	$\text{g cm}^{-3}$
$P_w^v$	Pressão de vapor da água pura	—
$(P_w^v)_{si}$	Pressão de vapor do sistema	—
$T$	Temperatura	$^\circ\text{C}$
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	$^\circ\text{C}$
$V$	Volume	$\text{cm}^3$
$V_{ap}$	Volume aparente	$\text{cm}^3$
$V_r$	Volume real	$\text{cm}^3$
$X_{bs}$	Umidade em base seca	$\text{g g}^{-1}$
$X_c$	Umidade crítica	$\text{g g}^{-1}$
$X_{eq}$	Umidade de equilíbrio	$\text{g g}^{-1}$
$X_m$	Umidade absorvida na monocamada	$\text{g g}^{-1}$
$X_u$	Umidade inicial da amostra em base úmida	$\text{g g}^{-1}$
$\lambda$	Comprimento de onda	cm
$\lambda_0$	Comprimento de onda no espaço livre	cm



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1 BATATA-DOCE .....	17
2.2 SECAGEM .....	17
2.3 SECAGEM DE FRUTAS E HORTALIÇAS .....	22
2.4 SISTEMA DE AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS .....	23
2.5 MICRO-ONDAS .....	25
2.6 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS NO AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS .....	26
2.7 SECAGEM DE ALIMENTOS POR MICRO-ONDAS .....	28
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
3.1 PADRONIZAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	30
3.2 SECAGEM .....	31
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	33
3.3.1 Temperatura .....	33
3.3.2 Umidade .....	33
3.3.3 Atividade de água .....	33
3.3.4 Massa específica aparente .....	33
3.3.5 Porosidade .....	34
3.3.6 Cor .....	35
3.3.7 Propriedades mecânicas .....	36
3.3.8 Esteroescopia óptica .....	36
3.3.9 Isotermas de sorção .....	36
3.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DIELÉTRICAS .....	37
3.4.1 Determinação das propriedades dielétricas de batatas-doces <i>in natura</i> e branqueadas .....	39
3.4.2 Determinação das propriedades dielétricas de batatas-doces desidratadas .....	39
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	40
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>41</b>
4.1 CINÉTICAS DE SECAGEM .....	41
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA .....	43
4.2.1 Microscopia óptica .....	43
4.2.2 Propriedades mecânicas .....	44
4.2.3 Porosidade e Massa específica aparente .....	45
4.2.4 Cor .....	47
4.2.5 Isotermas de Sorção .....	48
4.3 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS .....	50
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>55</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Hortalças são comumente consumidas *in natura*, comercializadas nas formas minimamente processadas, cozidas, desidratadas, ou utilizadas como ingredientes no preparo industrial de outros produtos. Dentre as hortalças, a batata-doce destaca-se devido ao seu excelente perfil nutritivo, sendo fonte de vitaminas, minerais e rica em fibras dietéticas. Com a alteração nas tendências alimentares resultante das rotinas das grandes cidades, a comercialização da batata-doce desidratada na forma de *snacks* atende à crescente demanda por alimentos práticos com alto teor nutricional.

As perdas na colheita, pós-colheita e armazenamento, podem atingir 30% a 40% do lote em países em desenvolvimento (JAYARAMAN e GUPTA, 2014). Neste contexto, a desidratação é uma excelente alternativa para a extensão da vida útil de frutas e hortalças através da redução do teor de umidade e atividade de água, inibição do crescimento microbiológico e diminuição das atividades enzimáticas.

Diversos métodos de secagem são aplicados industrialmente na desidratação de frutas e hortalças, sendo os mais popularizados a secagem solar, secagem convectiva, secagem a vácuo e liofilização. O método de secagem deve ser determinado a partir da análise das limitações de processo e do produto a ser desidratado, bem como da escala de produção e das características sensoriais desejadas para o produto final. A indústria de alimentos tem investido em tecnologias de secagem que propiciem menores tempo de processo e sejam capazes de minimizar as perdas nutricionais durante o processamento. Neste contexto, a secagem por micro-ondas a vácuo mostra-se como uma alternativa interessante para a desidratação de frutas e hortalças, devido apresentar alta taxa de secagem, produzindo alimentos de alta qualidade nutricional e sensorial. (GUNASEKARAN, 1999; MOUSA e FARID, 2002; ZHANG et al., 2006; CHANDRASEKARAN et al., 2013; MONTEIRO et al., 2015; MONTEIRO et al., 2016).

No entanto, para a determinação dos parâmetros ideais de secagem por micro-ondas, torna-se necessário o estudo das propriedades físico-químicas do alimento, em especial a variação da temperatura, umidade e atividade de água, fatores que influenciam diretamente na qualidade nutricional, conservação e vida útil do produto seco. Ademais, a consideração de características como cor, textura e porosidade também são de grande importância, por tratar-se de fatores relacionados à aceitação do alimento desidratado pelo consumidor. Outra propriedade físico-química muito importante na secagem por micro-ondas são as propriedades dielétricas do alimento que estão relacionadas à intensidade da absorção das ondas eletromagnéticas e da sua taxa de aquecimento. As propriedades dielétricas são influenciadas

por fatores como a frequência, temperatura, umidade, massa específica e composição dos alimentos. Dessa forma, as propriedades dielétricas influenciam diretamente na secagem com micro-ondas, sendo o seu conhecimento um estudo de extrema importância para a otimização e controle do processo de secagem.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo avaliar as mudanças nas propriedades físico-químicas e estruturais da batata-doce durante a produção de *chips* crocante através da secagem por micro-ondas a vácuo.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a cinética de secagem de fatias de batata-doce;
- Determinar a umidade, atividade de água, porosidade, massa específica aparente, propriedades instrumentais de textura e cor das fatias de batata-doce ao longo do processo de secagem;
- Determinar a isoterma de sorção de umidade das fatias de batata-doce após a secagem;
- Estimar as propriedades dielétricas da batata-doce *in natura*, branqueada e desidratada em função da umidade das amostras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BATATA-DOCE

A batata-doce é uma hortaliça feculenta, da variedade (*Ipomoea batatas* L. (Lam.)), cuja família botânica é a *Convolvulaceae*. Originária das Américas Central e do Sul, a batata-doce popularizou-se no mercado mundial, sendo atualmente encontrada em diversos países. As batatas-doces podem ser encontradas em diversas variedades, que se diferem pela coloração da casca e da polpa (roxo, salmão, amarelo, creme ou branco), pelas características da casca, formato da hortaliça, quantidade de amido e conteúdo de matéria seca (HORTIBRASIL, 2014).

De acordo com a FAOSTAT (2017), em 2014 a produção mundial da batata-doce foi de aproximadamente 107 milhões de toneladas, sendo 75% desta produção originária na Ásia, 21% na África e 4% no resto do mundo. Com aproximadamente 72 milhões de toneladas por ano, a China é o maior produtor de batata-doce, enquanto a produção no Brasil restringe-se a 505 mil toneladas.

A popularização do consumo de batata-doce está fortemente associada à sua qualidade nutritiva, sendo uma importante fonte de carboidrato, rica em fibras dietéticas, minerais, vitaminas e antioxidantes, como  $\beta$ -caroteno e ácidos fenólicos (ISHIDA et al., 2000). O carboidrato presente na batata-doce apresenta um baixo índice glicêmico, ou seja, possui uma estrutura química complexa que é absorvida mais lentamente pelo organismo, acarretando numa liberação fracionada de glicose na corrente sanguínea. Tal absorção lenta evita que sejam formados picos de glicose no sangue, sendo este efeito benéfico para pacientes diabéticos, auxiliando no controle dos níveis de glicose (ALLEN et al., 2012).

Entretanto, assim como diversas hortaliças, a batata-doce fresca possui uma vida útil limitada devido sua perecibilidade à deterioração microbiana. Considerando a faixa de temperatura do crescimento de fungos e bactérias deteriorantes, o armazenamento em baixas temperaturas é ineficaz no controle dos microrganismos presentes na batata-doce, tornando-se necessária a adoção de processos de conservação como congelamento, armazenamento a vácuo ou desidratação para prolongar sua vida útil.

### 2.2 SECAGEM

A secagem ou desidratação é um processo que consiste na eliminação de água de um produto por evaporação, com transferência de calor e massa. Do ponto de vista industrial, não

há diferença entre os termos ‘seco’ e ‘desidratado’, uma vez que ambos são resultantes do mesmo princípio físico, descrevendo a transferência de massa da água do interior do alimento até sua superfície, seguido de sua evaporação (GASCÓN; MURAVICK; ANDREUCETTI, 2013).

Os processos de desidratação de alimentos são utilizados, principalmente, para reduzir o teor de umidade e atividade da água, a fim de inibir o crescimento microbiano, diminuir a atividade enzimática e as taxas de reações químicas (VAN ARSDEL, 1963; FELLOWS, 2006; RATTI, 2001). Sendo a água o principal componente dos alimentos, a quantidade de água e a disponibilidade da mesma na estrutura dos alimentos são fatores de grande influência para a conservação, participando da maior parte das reações químicas e biológicas dos alimentos (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2008). O teor de umidade de um alimento representa a quantidade total de água presente no mesmo, sendo um importante índice para a estimativa da vida útil dos alimentos. Entretanto, a umidade não leva em consideração a disponibilidade da água contida nos alimentos para reações químicas, microbiológicas e enzimáticas. Neste contexto, para uma determinação mais precisa da taxa de deterioração de um alimento, torna-se necessário o conhecimento da atividade de água ( $a_w$ ) que determina a quantidade de água disponível no alimento para o crescimento microbiológico (LABUZA; TANNEMBAUM; KAREL, 1970). A atividade de água é definida como a diferença de potencial químico da água presente no alimento e o potencial químico da água no ar circundante. Em condição de equilíbrio, a atividade de água é definida como a razão entre a pressão parcial de vapor de água no sistema e a pressão parcial de vapor da água pura em mesma temperatura (Equação 1). A atividade de água de um alimento também pode ser expressa em termos de umidade relativa ( $UR$ ) do ar que envolve o alimento em equilíbrio termodinâmico. Ocorrendo igualdade de temperatura, a pressão parcial do vapor de água no ar deve ser igual à pressão parcial da água no alimento (BARBOSA-CANOVAS et al., 2007).

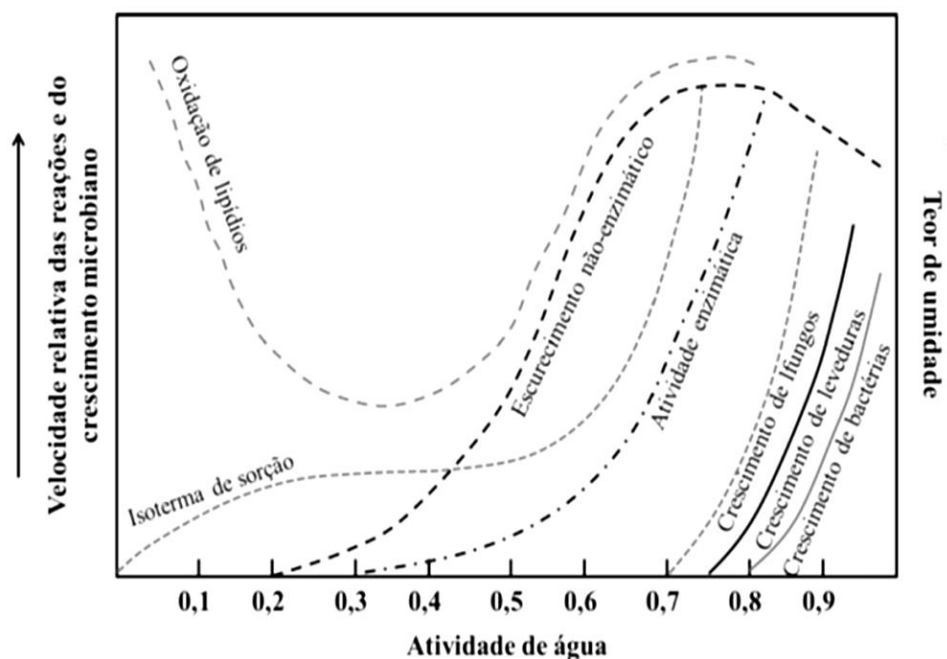
$$a_w = \frac{(P_w^v)_{si}}{P_w^v} = UR \quad (1)$$

na qual  $(P_w^v)_{si}$  é a pressão de vapor do sistema;  $P_w^v$  é a pressão de vapor de água pura e  $UR$  é a umidade relativa. Dessa forma, a determinação da atividade de água de um alimento permite quantificar o grau de ligação da água contida no produto, bem como sua disponibilidade para participar de reações químicas, bioquímicas e microbiológicas (FENNEMA, 2010).

Na Figura 1 são mostradas as importâncias relativas das diferentes reações químicas e crescimento microbiano em função da atividade de água dos alimentos.

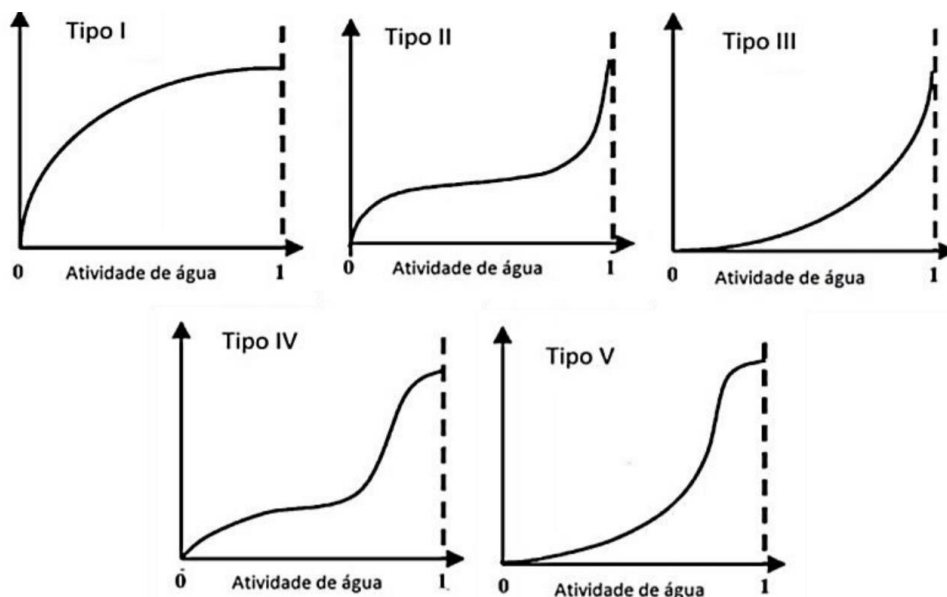


**Figura 1** - Velocidade relativa de reações em função da atividade de água.



Fonte: adaptado de Labuza, Tannenbaum e Karel (1970).

Sendo a umidade e a atividade de água fatores importantes para determinar a estabilidade de um alimento frente à deterioração microbiológica e enzimática, o conhecimento da relação entre tais fatores através de isotermas de sorção é conveniente. As isotermas de sorção descrevem a relação de equilíbrio entre a umidade de um alimento e sua atividade de água em uma dada temperatura (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2005). Com a construção da curva de isoterma de sorção de um produto, torna-se possível prever a estabilidade do produto durante o armazenamento (PAVAN, SCHMIDT e FENG, 2012). De acordo com Brunauer (1938), as isotermas de sorção podem ser classificadas em cinco tipos (Figura 2), sendo as do tipo II e III mais comumente encontradas para alimentos secos devido sua característica higroscópica.

**Figura 2** - Tipos de isoterma de sorção

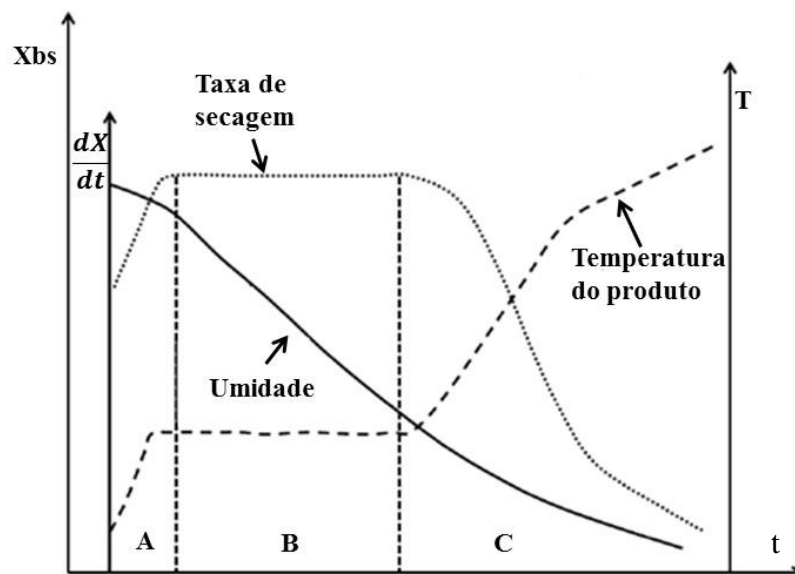
Fonte: Adaptado de Brunauer et al., 1938.

Existem diversos métodos de análise que buscam relacionar a umidade e a atividade de água possibilitando a construção da isoterma de sorção, sendo o mais empregado o acondicionamento do alimento em recipientes hermeticamente fechados contendo soluções salinas saturadas de atividade de água conhecida, armazenados a temperatura constante (FELLOWS, 2006). Dependendo da solução salina empregada, as isotermas de sorção podem ser construídas a partir da reidratação de uma amostra seca (adsorção), pela desidratação de uma amostra úmida (dessorção) ou pela combinação dos dois métodos (CARTER e SCHMIDT, 2012).

A umidade e atividade de água, bem como as demais propriedades físico-químicas do produto desidratado, são fortemente influenciadas pelas características intrínsecas da matéria-prima, do método de secagem empregado e dos parâmetros de operação (CHEN e MUJUMDAR, 2008). A secagem de um alimento consiste em um processo de transferência simultânea de calor e massa, onde calor é fornecido ao produto de forma a promover a passagem de estado físico da água livre presente no alimento para vapor, reduzindo assim seu teor de umidade (GEANKOPLIS, 1993). Os mecanismos de transporte da fase líquida e vapor no interior do alimento dependem do tipo do produto e de sua umidade inicial (FELLOWS, 2006). O processo de secagem convencional, regido pela transferência de calor resultante da diferença de potencial térmico entre o ar aquecido e o alimento, é usualmente dividido em três etapas definidas (Figura 3) de acordo com a evolução das transferências de calor e massa ao longo do

processo (PARK et al., 2007):

**Figura 3** - Curvas típicas de secagem.



Fonte: Adaptado de Park et al. (2007).

A) a primeira etapa do processo de secagem é chamada de fase de adequação (GEANKOPLIS, 1993), onde inicialmente o alimento encontra-se em temperatura inferior a temperatura do ar. Por transferência de calor, a temperatura do produto eleva-se formando um gradiente, até sua superfície atingir um estado de equilíbrio (temperatura de bulbo úmido do ar de secagem); B) atingido o estado de equilíbrio termodinâmico, a água livre presente na superfície do material recebe o calor latente do ar e ocorre a evaporação, iniciando a secagem à taxa constante. Durante o período de secagem de taxa constante, a variação da temperatura do material é praticamente nula, pois as taxas de transferência de calor e massa se igualam, ou seja, todo calor fornecido pela transferência de calor é absorvido para a evaporação da água superficial, originando um gradiente de umidade e a transferência de massa. O fim desse período é marcado pela aproximação da umidade crítica do sistema (GEANKOPLIS, 1993); C) a última etapa da secagem é chamada de período de secagem à taxa decrescente, sendo caracterizada pela redução da velocidade de secagem. Nesta etapa ocorre a diminuição da quantidade de água na superfície do produto, dificultando a transferência de massa. Com a redução da água livre, o calor transferido não é completamente convertido para a mudança de fase da mesma, ocorrendo um aumento na temperatura do produto que se iguala à temperatura do ar de secagem. Neste ponto, a umidade de equilíbrio é atingida em relação ao ambiente de secagem, marcando o fim do processo (GEANKOPLIS, 1993).

## 2.3 SECAGEM DE FRUTAS E HORTALIÇAS

Para hortaliças, a desidratação apresenta-se como uma alternativa para a redução dos desperdícios na cadeia produtiva, estendendo sua vida útil através da produção de um alimento saudável, prático e conveniente ao consumo. Ademais, hortaliças desidratadas possuem um apelo comercial devido às suas características organolépticas, sendo a secagem considerada um método que agrega valor à matéria-prima. A produção de hortaliças desidratadas é vantajosa pois reduz custos de transporte e armazenamento, uma vez que os produtos secos apresentam um menor volume e peso. Após o processo de desidratação, a escassez de água livre presente na estrutura das hortaliças permite seu armazenamento à temperatura ambiente, poupando recursos energéticos. (AGUILERA et al., 2003; SINGH e HELDMAN, 2009).

A desidratação de hortaliças pode ser realizada através de diversos métodos industriais, sendo os mais empregados a secagem solar, secagem convectiva, secagem a vácuo e liofilização. Estes métodos de secagem apresentam produtos desidratados com características físico-químicas e organolépticas distintas para um mesmo produto (matéria-prima), possibilitando a escolha de um método mais adequado para cada produto. Para a determinação do processo mais favorável, diversos fatores devem ser considerados: as características físicas, de forma e rigidez da matéria-prima, as restrições de temperatura e pressão da matéria-prima, as características desejáveis para o produto desidratado e o tempo de secagem e a eficiência energética do processo (CHEN e MUJUMDAR, 2008).

O processo de secagem mais popular na produção de frutas e hortaliças desidratadas é a secagem convectiva (KARAM et al., 2016). A secagem convectiva consiste na evaporação da umidade superficial do material a ser desidratado através do contato com ar quente circulante. Porém este processo apresenta baixa eficiência energética e longos tempos de secagem durante o período de taxa decrescente de secagem. Outras desvantagens associadas à secagem convectiva são a alteração significativa na cor do material, a degradação de nutrientes devido ao emprego de temperaturas elevadas, encolhimento e deformação do produto desidratado (CHEN e MUJUMDAR, 2008).

Com a finalidade de contornar as desvantagens associadas ao processo, a secagem convectiva tem sido utilizada em combinação com outras técnicas de secagem (micro-ondas, vácuo ou aplicação de radiação infravermelha), de forma a otimizar sua eficiência energética e reduzir a exposição a elevadas temperaturas (CALÍN-SÁNCHEZ et al., 2014; MOTEVALI et al., 2014; ZIELINSKA e MARKOWSKI, 2016; KARAM et al., 2016).

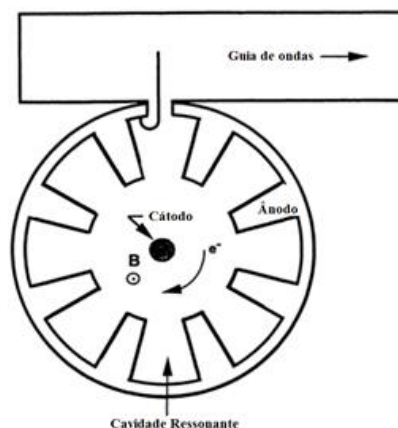
A exposição à altas temperaturas é o principal fator de degradação de vitaminas e aminoácidos termossensíveis, sendo assim o emprego de vácuo no processo de secagem é uma alternativa interessante (CHEN e MUJUMDAR, 2008). No processo de secagem a vácuo, a redução na pressão do sistema permite elevada taxa de evaporação devido a diminuição da temperatura de saturação da água, o que proporciona tempos de secagem inferiores aos necessários na secagem convectiva. Ademais, a secagem a vácuo impede a oxidação devido à ausência de ar e, conseqüentemente, mantém a cor, textura e sabor dos produtos secos. O vácuo nos processos de secagem pode ser empregado em fornos de secagem condutiva, sistemas de liofilização e também em fornos de micro-ondas.

## 2.4 SISTEMA DE AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS

O sistema de aquecimento por micro-ondas pode ser avaliado em três componentes básicos: uma fonte geradora de energia eletromagnética, o meio de transmissão que proporciona a propagação da onda eletromagnética até o material a ser aquecido e o corpo receptor. No corpo receptor, as ondas eletromagnéticas incidentes podem ser absorvidas ou refletidas pelo material, sendo esta reação regida pelas propriedades elétricas e magnéticas do mesmo (THOSTENSON e CHOU, 1999).

A geração das ondas eletromagnéticas dos aparelhos de micro-ondas, tanto industriais quanto domésticos, é resultante de um processo de aceleração de cargas em tubos a vácuo. Os tubos mais aplicados são os magnetrons, que possuem estruturas de ressonância para gerar campos eletromagnéticos de frequência fixa. No interior deste tubo de vácuo, encontra-se um filamento central emissor de elétrons (cátodo), que é cercado por uma estrutura anódica, conforme indicado na Figura 4 (SCHUBERT e REGIER, 2005).

**Figura 4** - Representação esquemática de um magnetron (gerador de ondas eletromagnéticas em aparelhos de micro-ondas).



**Fonte:** Adaptado de Thostenson e Chou (1999).

As micro-ondas são geradas através da aplicação de uma diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo, produzindo um forte campo eletromagnético, aquecendo o cátodo e resultando no desprendimento dos elétrons mais externos da camada de valência do mesmo. Os elétrons liberados são acelerados em direção ao ânodo pela ação do campo elétrico, sofrendo também a influência de um campo magnético gerado por um ímã presente na superfície externa do magnetron. Devido a ação destas forças, os elétrons desprendidos do cátodo são acelerados em uma trajetória espiral ao redor do ânodo, no interior das cavidades de ressonância, gerando um perfil de oscilação que depende do tamanho destas cavidades (THOSTENSON e CHOU, 1999). Neste processo, há o estabelecimento de um circuito ressonante, produzindo energia eletromagnética. Esta energia é então direcionada através de uma antena posicionada sobre o ânodo, enviando as micro-ondas para o interior do forno. (ZLOTORZYNSKI, 1995).

Um dos principais desafios do aquecimento por micro-ondas é a distribuição desuniforme das ondas eletromagnéticas no interior da cavidade do forno. A uniformidade da taxa de aquecimento do produto em todo seu volume é diretamente dependente da uniformidade das ondas eletromagnéticas incidentes (SCHUBERT e REGIER, 2005). Sendo o campo eletromagnético desuniforme, há uma diferença na quantidade de ondas absorvidas em diferentes pontos do alimento, o que resulta no surgimento de um gradiente de temperatura.

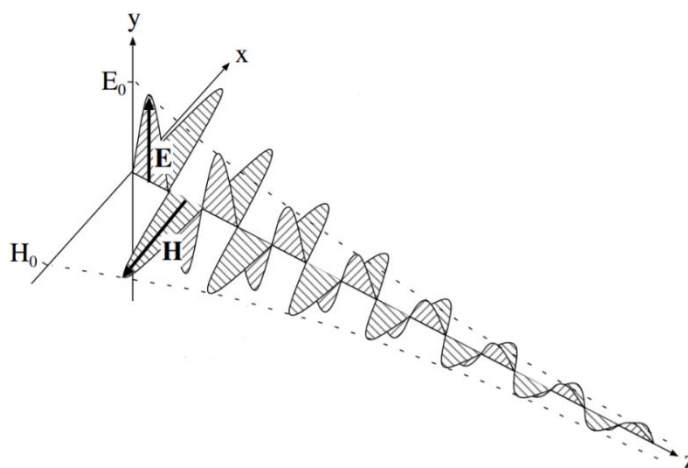
O projeto e conformação do sistema gerador de micro-ondas, do guia de ondas e da cavidade ressonante possui papel fundamental na uniformidade do aquecimento no interior do forno. Sem a devida análise de projeto, o sistema de micro-ondas pode apresentar uma ressonância ineficiente, resultando na convergência de parte das ondas, condição propícia para o surgimento de *hot spots*. Os *hot spots* são caracterizados por pontos de superaquecimento no

produto, onde a temperatura desejada é extrapolada devido à concentração de ondas eletromagnéticas incidentes (DATTA e ANANTHESWARAN, 2001). Entretanto, diversos recursos tecnológicos podem ser empregados para aumentar a uniformidade da incidência das ondas no interior do forno de micro-ondas, tais como a instalação de pratos giratórios ou tambor rotativo, agitadores de onda (*mode stirrers*), controladores de potência e temperatura (MONTEIRO et al., 2015).

## 2.5 MICRO-ONDAS

Micro-ondas são caracterizadas por ondas eletromagnéticas, ou seja, ondas que possuem simultaneamente um campo elétrico e um campo magnético, que oscilam perpendicularmente entre si (MUJUMDAR, 2006). Os campos magnético e elétrico formam uma onda plana uniforme, sendo perpendiculares à direção de propagação da onda (DATTA, 2001), conforme representado na Figura 5.

**Figura 5** - Ilustração de uma onda eletromagnética plana, onde  $E$  e  $H$  são o campo elétrico e eletromagnético, sendo  $E_0$  e  $H_0$  suas respectivas amplitudes.



Fonte: Adaptado de Datta (2001).

As micro-ondas pertencem a uma fração do espectro eletromagnético correspondente a comprimentos de onda de 1 m até 1 mm, com frequências de 300 Mhz e 300 Ghz, respectivamente. Entretanto, as frequências empregadas no aquecimento doméstico e industrial de alimentos por micro-ondas são restritas a 915MHz ou 2450MHz. (ANANTHESWARAN, 2001). Tendo em vista que o comprimento de onda ( $\lambda$ ) é resultante da razão entre a velocidade da luz no meio ( $c$ ) e a frequência ( $f$ ), torna-se possível estimar o comprimento de onda

correspondente às frequências permitidas para aquecimento em micro-ondas através da Equação 2 (SINGH e HELDMAN, 2009).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

Considerando a velocidade da luz no vácuo ( $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ), os comprimentos de onda para as frequências de 915 Mhz e 2450 Mhz, são 32,8 e 12,2 cm, respectivamente.

O aquecimento de alimentos por micro-ondas é resultante de dois mecanismos distintos: a rotação dipolar e a condução iônica (MEREDITH, 1998). O mecanismo de rotação dipolar descreve a rotação da molécula de água que, quando exposta a um campo elétrico, sofre inversão de polos de forma a alinhar-se com a polaridade do campo incidente. Como a frequência do campo de micro-ondas é muito elevada, as moléculas de água em rotação no interior do alimento se atritam, resultando no aquecimento volumétrico do alimento. Já o mecanismo de condução iônica descreve a atuação dos íons do material que, acompanhando a oscilação do campo elétrico, acabam por colidir entre si ou com as demais moléculas, provocando uma dissipação de calor nesta colisão (THOSTENSON, 1999). Tais mecanismos descrevem qualitativamente a conversão da energia eletromagnética em energia térmica. Para uma análise quantitativa da interação entre as micro-ondas e o alimento submetido às mesmas, torna-se necessário a avaliação das suas propriedades dielétricas. Essas propriedades influenciam significativamente a distribuição do campo eletromagnético e a conversão da energia eletromagnética em energia térmica dentro dos materiais (TANG, 2005).

## 2.6 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS NO AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS

A propriedade dielétrica fundamental através da qual as interações podem ser determinadas é a constante de permissividade relativa ( $\epsilon^*$ ). A permissividade relativa determina a suscetibilidade do material a sofrer polarização quando exposto a um campo eletromagnético externo. Tal propriedade determina o armazenamento e a dissipação da energia elétrica e pode ser expressa pela Equação 3.

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (3)$$



na qual a permissividade ou constante dielétrica ( $\epsilon'$ ) representa a capacidade de um material armazenar energia elétrica e influencia principalmente a distribuição dos campos eletromagnéticos no interior do material. A equação possui um termo imaginário ( $\epsilon''$ ), fator (ou constante) de perda, que indica a capacidade do material de dissipar energia eletromagnética na forma de calor (KOMAROV, et al., 2005).

Outro parâmetro analisado para a modelagem do aquecimento de alimentos por micro-ondas é a potência dissipada ( $P_v$ ). Essa propriedade está relacionada com a quantidade de energia proveniente da onda eletromagnética que é dissipada volumetricamente no alimento. Conhecendo-se as propriedades dielétricas do alimento, torna-se possível calcular a potência dissipada e também a elevação da temperatura do material durante o aquecimento por micro-ondas (GOLDBLITH, 1966) através das equações 4 e 5, respectivamente.

$$P_v = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2 \quad (4)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_v}{\rho c_p} \quad (5)$$

na qual  $E$  é o campo elétrico local ( $V m^{-1}$ ),  $f$  é frequência (Hz),  $T$  é a temperatura do material ( $^{\circ}C$ ),  $c_p$  é o calor específico do material ( $J kg^{-1} ^{\circ}C^{-1}$ ) e  $\rho$  é a massa específica do material ( $kg m^{-3}$ ). Entretanto, as ondas eletromagnéticas possuem um limite de penetração no alimento, definida a partir da redução da potência no interior do mesmo. A profundidade de penetração ( $dp$ ) corresponde à profundidade em que a potência dissipada é reduzida para  $1/e$ , sendo  $e$  o número de Euler ( $\approx 2,718$ ) da potência de entrada na superfície (VON HIPPEL, 1954; KOMAROV et al., 2005).

Dessa forma, a profundidade de penetração das micro-ondas em um material pode ser determinada através da Equação 6:

$$dp = \frac{1}{2\alpha} = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\epsilon' \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right]}} \quad (6)$$

Torna-se evidente a influência das propriedades dielétricas no aquecimento por micro-ondas, sendo parâmetros como a profundidade de penetração das micro-ondas, potência

volumetricamente dissipada e variação da temperatura no interior do alimento dependentes das constantes dielétricas.

As propriedades dielétricas de um material são resultantes de sua estrutura interna e composição, ocasionando diferentes respostas de absorção ou dissipação da energia fornecida pelas ondas eletromagnéticas (THOSTENSON, 1999). Sabendo-se que as propriedades dielétricas influenciam no processo de desidratação de alimentos por micro-ondas, seu conhecimento em função do teor de umidade é essencial na concepção e controle destes sistemas. Entretanto, as propriedades dielétricas dos alimentos não são constantes durante a secagem, apresentando uma variação substancial do início do processo até a obtenção do produto desidratado (HOLTZ et al., 2010).

A água é um dos principais constituintes dos produtos alimentícios, portanto, sua interação com o campo de micro-ondas rege o aquecimento volumétrico do alimento. Podendo ser classificada em: i) água livre no espaço intercelular; ii) água fracamente ligada e; iii) água fortemente ligada aos compostos polares do alimento. As moléculas de água livre presentes no espaço intercelular possuem propriedades dielétricas semelhantes às da água pura.

No geral, as propriedades dielétricas (constante dielétrica e constante de perda) dos alimentos decrescem rapidamente com a diminuição do teor de umidade, até que um estado de umidade crítica seja atingido, onde as propriedades dielétricas deixam de ser influenciadas pela água presente no alimento (SCHUBERT, 2005).

## 2.7 SECAGEM DE ALIMENTOS POR MICRO-ONDAS

Nas últimas décadas, o forno de micro-ondas popularizou-se como eletrodoméstico, apresentando como principais vantagens menores tempos de cozimento e economia de energia quando comparado com o forno convencional. Porém, a aplicação de micro-ondas em processos industriais de secagem em larga escala de alimentos ainda é uma área tecnológica em desenvolvimento. Em escala industrial, a secagem por micro-ondas apresenta vantagens similares a sua aplicação doméstica, sendo ressaltadas a alta taxa de secagem, economia de energia, redução significativa do tempo de secagem e facilidade de operação e manutenção (CHANDRASEAKARAN et al., 2013).

A secagem por micro-ondas caracteriza-se como um processo complexo baseado no aquecimento volumétrico do alimento, as ondas eletromagnéticas penetram o alimento, o campo eletromagnético induz a rotação dos dipolos, sendo o calor gerado através da fricção

das moléculas (AGUILAR-REYNOSA et al., 2017). Devido à grande taxa de penetração das micro-ondas, a temperatura da parte interna e da superfície externa do alimento aumentam simultaneamente. Durante o aquecimento, vapor de água é gerado no interior do alimento e em seguida é transportado para o exterior devido ao gradiente de pressão gerado (GUO et al., 2017). Este mecanismo de aquecimento é responsável pelas vantagens relacionadas à secagem por micro-ondas, tais como maior uniformidade de aquecimento, menor tempo de secagem, reduzido custo energético, maior qualidade do produto final e maior flexibilidade de operação, podendo ser empregado para uma grande variedade de produtos desidratados (ZHANG et al., 2006).

Como a produção de vapor no interior do alimento é mais rápida do que a difusão do mesmo até a superfície, ocorre o fenômeno conhecido como expansão da amostra (*puffing*) (ZHANG et al., 2006). Como resultado do *puffing*, o alimento desidratado adquire uma característica porosa, pois a expansão do vapor de água na mudança de fase resulta na formação de cavidades ocas no interior do alimento. Dessa forma, a secagem por micro-ondas resulta em alimentos com alta porosidade e crocância, quando comparados com a secagem convectiva (ZHANG et al., 2006).

A secagem de alimentos por micro-ondas pode ser dividida em três etapas: i) o período de aquecimento, onde a energia proveniente das ondas eletromagnéticas que penetram no alimento é convertida em energia térmica no interior do mesmo, aumentando gradualmente sua temperatura. ii) período de taxa constante, que ocorre quando a água presente no alimento atinge temperatura ou pressão de vapor suficiente para sua mudança de fase e toda a energia eletromagnética absorvida pelo alimento é direcionada para a evaporação da água livre e; iii) período de taxa decrescente, onde a umidade do alimento foi reduzida a um ponto onde a energia necessária para a mudança de estado da água é inferior à energia térmica convertida pelas micro-ondas. Uma vez atingido esse estágio, a temperatura do alimento volta a aumentar pela dissipação da energia das ondas incidentes. (ZHANG et al., 2006).

Alimentos desidratados por processos utilizando micro-ondas sofrem alterações visuais como cor e aparência, alterações nas propriedades sensoriais como aroma e sabor, alterações estruturais como massa específica aparente e real, porosidade, e textura, bem como alterações em seu perfil nutricional (GUO et al., 2017).

Entretanto, o aquecimento por micro-ondas a vácuo resulta em menores perdas sensoriais e nutricionais nos alimentos quando comparado aos métodos convencionais de secagem. (VADIVAMBAL e JAYAS, 2010). Neste contexto, a secagem por micro-ondas a vácuo vem sendo utilizada como uma alternativa para a produção de frutas e hortaliças

desidratadas de alta qualidade nutricional e sensorial, com baixo custo de processo e rápidas taxas de secagem. (MOUSA e FARID, 2002; FIGIEL, 2009; SCAMAN e DURANCE, 2014).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 PADRONIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram adquiridas no comércio local de Florianópolis - SC (Brasil) amostras de batata-doce (*Ipomoea batatas* L. Lam), pré-selecionadas visualmente quanto ao seu tamanho, forma e presença de injúrias. Com a finalidade de promover a padronização do método, cada unidade de batata doce teve seu comprimento e diâmetro aferido utilizando um paquímetro. As amostras selecionadas apresentaram comprimento médio de  $232,00 \pm 38,0$  mm. Neste estudo, o diâmetro das batatas-doces foi determinado em três pontos equidistantes, sendo os valores médios:  $D_1 = 51,5 \pm 11,2$  mm,  $D_2 = 71,0 \pm 8,6$  mm e  $D_3 = 54,5 \pm 11,8$  mm.

**Figura 6** - Batatas-doces (*Ipomoea batatas* L. Lam,) utilizadas nas análises.



As batatas-doces selecionadas foram lavadas e descascadas manualmente e, em seguida, fatiadas. Para tal processo, utilizou-se uma mandolina profissional (Progressive, Modelo - PL8®, Estados Unidos), ajustada de forma a produzir fatias com uma espessura de  $4,2 \pm 0,5$  mm. Com a finalidade de contornar a variação de diâmetro das fatias e padronizar as amostras, utilizou-se um molde cilíndrico de aço inox para cortar as mesmas, resultando em amostras com diâmetro de  $41,5 \pm 0,2$  mm.

Em seguida, as amostras sofreram branqueamento, processo que consiste na imersão das fatias em um recipiente (béquer) contendo água destilada à temperatura de  $97^{\circ}\text{C}$  durante 5

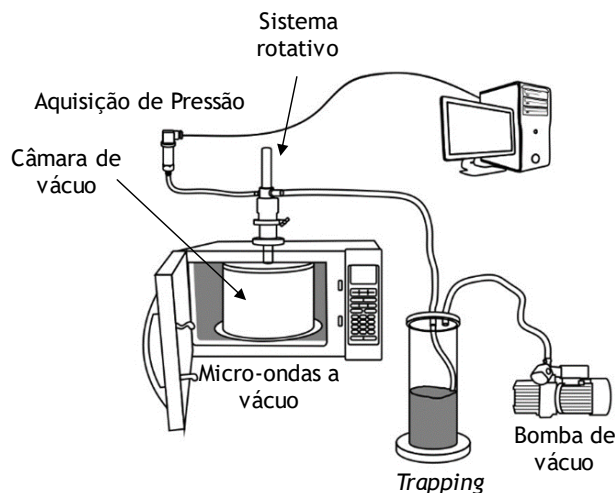
minutos, seguida da imersão em água destilada resfriada à 6°C durante 3 minutos. Em ambas as etapas, a razão amostra/água destilada foi de 1:20 (g:mL). As amostras retiradas da água resfriada foram dispostas individualmente sobre papel filtro durante 1 minuto para a remoção do excesso de umidade.

### 3.2 SECAGEM

Para a produção dos *chips*, as amostras de batata-doce previamente selecionadas e branqueadas foram submetidas ao processo de secagem em um forno de micro-ondas doméstico (Electrolux, Modelo MEX55, Brasil) com espaço interno de 45 L, potência máxima de saída do magnetron de 1000 W e frequência das ondas de 2450 MHz. No interior do forno, uma câmara cilíndrica de polipropileno (30,0 cm de diâmetro e 20,2 cm de altura) foi acoplada sobre o prato giratório, atuando como câmara de vácuo. O polipropileno é considerado adequado para aplicação na secagem por micro-ondas, pois apresenta resistência térmica e mecânica satisfatória, além de ser atóxico (não libera resíduos poliméricos ou aditivos durante o contato com o alimento, mesmo quando aquecido). Ademais, o polipropileno apresenta baixa resistência dielétrica e constante dielétrica moderada (constante dielétrica,  $\epsilon' = 2,2$ , e tangente de perda,  $\tan\delta = 0,0003-0,0004$ ), ou seja, possui baixa capacidade de absorver as ondas eletromagnéticas e convertê-las em calor. Tal característica é desejável no aquecimento por micro-ondas pois, além de não ser um obstáculo para a incidência das ondas eletromagnéticas no alimento, o polipropileno não sofre um aumento excessivo de temperatura.

A câmara de vácuo foi conectada a uma bomba de vácuo de vazão nominal de  $350 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  (D.V.P, Vacuum Technology, Modelo - LC.305, Itália) e a um transdutor (Warme, Modelo - WTP4010, Brasil) conectado a um computador para registro da pressão. Para garantir a uniformidade da distribuição das ondas eletromagnéticas através do movimento de rotação da câmara de vácuo, a bomba de vácuo e o transdutor de pressão foram conectados à mesma através de um sistema rotatório constituído de uma válvula T conectada por uma junta rotativa. Nesta junta o eixo fixo é conectado à bomba de vácuo e ao transdutor de pressão e o eixo livre é conectado à câmara de vácuo. O dispositivo experimental do secador de micro-ondas a vácuo está esquematizado na Figura 7. Os detalhes completos sobre a adaptação do micro-ondas a vácuo podem ser encontrados em Monteiro et al. (2015).

**Figura 7** - Esquema micro-ondas a vácuo



Fonte: Monteiro et al. (2015, 2018).

Para a disposição das amostras no interior da câmara de vácuo, foi utilizada uma bandeja circular de polipropileno de 27,0 cm de diâmetro, na superfície da qual foram distribuídas 16 fatias ( $97,04 \pm 0,04$  g). Após a distribuição das amostras na bandeja, a câmara de vácuo foi acoplada no interior do forno de micro-ondas e a pressão da câmara reduzida até 4 kPa. Atingindo-se a pressão desejada, o gerador de micro-ondas foi acionado, mantendo a pressão de vácuo até o término da secagem. O tempo total de processo foi de 27 minutos, onde a potência empregada para a secagem das amostras de batata-doce foi modulada em 3 etapas definidas experimentalmente:

- a) Etapa inicial: 6 minutos a 1000 W;
- b) Etapa intermediária: 6 minutos a 400 W;
- c) Etapa final: 15 minutos a 200 W.

A modulação da potência é empregada com a finalidade de manter uma elevada taxa de secagem durante todo o processo, adequando-se ao teor de umidade das amostras e à temperatura das mesmas, de forma a prevenir o sobreaquecimento das amostras. Foram retiradas amostras em intervalos de tempo de 2 minutos, com exceção do ponto final, a fim de elaborar uma curva de secagem, analisando-se a temperatura e o teor de umidade das amostras em cada ponto. Para garantir a reprodutibilidade e evitar a distorção das medidas resultante da interrupção do processo de secagem, a coleta das amostras foi realizada de forma destrutiva, ou seja, cada ponto experimental da curva de secagem é resultante de um novo processo de secagem.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras *in natura*, branqueadas e desidratadas durante a secagem por micro-ondas a vácuo foram analisadas quanto umidade, atividade de água, temperatura, cor, massa específica aparente, porosidade, propriedades mecânicas e propriedades dielétricas. Além destas, foram realizadas análises de captura de imagens das amostras desidratadas por estereoscópio óptico, bem como foi determinado a isoterma de sorção de umidade das amostras de *chips* de batata-doce.

#### 3.3.1 Temperatura

A temperatura das fatias de batata-doce foi aferida utilizando termopares do tipo T (Iope, Modelo A-TX-TF-TF-R30AWG, Brasil) conectados a um sistema de aquisição de dados (Agilent Technologies, Modelo – 34970A, Estados Unidos). Os valores de temperatura foram medidos em triplicata de amostra, imediatamente após o desligamento do forno e retirada das amostras.

#### 3.3.2 Umidade

O teor de umidade das amostras foi determinado em estufa a vácuo (TE-395, TECNAL, Piracicaba, Brasil) a 70 °C (AOAC, 2005). As análises foram realizadas em triplicata.

#### 3.3.3 Atividade de água

A atividade de água foi determinada com um higrômetro digital (Aqualab Series 3, Decagon Devices, Inc., Pullman, EUA). Para a realização desta leitura, as amostras foram trituradas e condicionadas em recipientes adequados para a leitura no higrômetro, sendo esta realizada em triplicata de amostra.

#### 3.3.4 Massa específica aparente

A massa específica aparente ( $\rho_{ap}$ ) foi calculada utilizando a massa das amostras ( $m_s$ ) e seu volume aparente ( $V_{ap}$ ) (Equação 7)

$$\rho_{ap} = \frac{m_s}{V_{ap}} \quad (7)$$

O volume aparente ( $V_{ap}$ ) foi determinado analisando-se a força de empuxo associada à amostra submersa em *n*-heptano (Lozano et al., 1980). Para a realização das leituras, as amostras foram alocadas em um recipiente metálico esférico, com perfurações para permitir a passagem do líquido. Este recipiente possui em sua extremidade um gancho de aço, que foi conectado à abertura da parte inferior de uma balança analítica (Marte, Modelo -AY220, Filipinas). A determinação do volume aparente foi realizada em triplicata de amostra.

### 3.3.5 Porosidade

A porosidade ( $\varepsilon$ ) é caracterizada pela fração de ar presente no material, sendo determinada pela razão entre o volume de ar aprisionado nos poros e o volume total da amostra. Uma vez determinado o volume aparente ( $V_{ap}$ ), é possível relacioná-lo com o volume real ( $V_r$ ) para determinar a porosidade da amostra (Equação 8)

$$\varepsilon = \left( 1 - \frac{V_r}{V_{ap}} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

Para a determinação do volume real ( $V_r$ ), foi utilizado um picnômetro de ar comprimido (Figura 10) conforme metodologia descrita por Sereno et al. (2007). O picnômetro de ar comprimido é capaz de determinar a porosidade de um material sólido devido à penetração do gás nos poros da amostra.

**Figura 8** - Picnômetro de ar comprimido





O picnômetro de ar comprimido consiste num sistema com duas câmaras separadas por uma válvula, a primeira (câmara de referência) conectada à uma mangueira de ar comprimido e a um transdutor de pressão, enquanto a segunda possui abertura para a saída do ar e inserção da amostra. O princípio de operação do picnômetro consiste na injeção de gás comprimido na câmara de referência, cujo volume é constante e conhecido, obtendo-se os valores de temperatura e pressão. Em seguida, a válvula que separa as câmaras é aberta, permitindo que o ar injetado na câmara de referência expanda-se até a segunda câmara, que contém a amostra. Com a expansão do gás, alteram-se os valores de temperatura e pressão medidos pelo transdutor. Assumindo comportamento de gás ideal, o volume real ( $V_r$ ) da amostra inserida na segunda câmara pode ser calculado através da Equação 9.

$$V_r = \frac{V_1 \left( \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} - 1 \right)}{\left( \frac{P_{atm}}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_{amb}} - 1 \right)} + V_2 \quad (9)$$

na qual  $V_1$  é o volume da câmara de referência;  $P_{atm}$  e  $T_{atm}$  são a pressão e a temperatura, respectivamente, medidas com o picnômetro vazio e as válvulas 2 e 3 abertas;  $P_1$  e  $T_1$  são a pressão e a temperatura medidas a partir do equilíbrio na câmara de referência (com todas as válvulas fechadas);  $P_2$  e  $T_2$  são a pressão e a temperatura medidas após a abertura da válvula 2, sendo o valor referente ao ar expandido em ambas as câmaras.

### 3.3.6 Cor

Para a quantificação da cor utilizou-se um colorímetro portátil Minolta Chroma Meter (Konica Minolta, Modelo - CR-400, Japan). Os resultados são expressos pelo sistema CIELab, definido pela CIE (*Comission Internationale de l'Eclairage*) (1976), que representa um sistema de coordenadas tridimensional. Nesse sistema, a coordenada vertical  $L$  especifica o brilho da cor, as coordenadas horizontais  $a$  e  $b$  representam a matiz e a saturação das bandas vermelho/verde e amarelo/azul, respectivamente. A variação total da cor das amostras foi avaliada individualmente pelo parâmetro  $\Delta E^*$  (Equação 10), sendo as leituras realizadas em ambos os lados da fatia, sendo a leitura realizada em quadruplicata de amostra

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (10)$$

### 3.3.7 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas das amostras foram determinadas por meio de teste de penetração. Os testes foram realizados em um texturômetro com célula de carga de 25 kg (Stable Micro System, Modelo - TA-XT2-Plus, Reino Unido), utilizando uma probe cilíndrica de 2 mm de diâmetro, velocidade da probe de  $3 \text{ mms}^{-1}$ , perfurando a amostra até 70% de sua espessura original. A análise foi realizada em triplicata de amostra e quaduplicata de análise (4 perfurações foram realizadas em cada amostra, em diferentes regiões).

### 3.3.8 Esteroescopia óptica

Visando a análise detalhada da estrutura interna das amostras de batata-doce submetidas ao processo de secagem por micro-ondas a vácuo, utilizou-se um estereoscópio óptico (Meiji, Modelo - RZ, Japão) acoplado com uma câmera microscópica (OptiCam, Modelo - OPT 10000, Brasil) para registrar imagens micrográficas. As amostras foram fraturadas manualmente, permitindo a análise micrográfica da superfície e da estrutura interna. As imagens capturadas foram analisadas utilizando *software* TSview (Tucsen, V, 7.3.1.7, China).

### 3.3.9 Isotermas de sorção

As isotermas de sorção foram determinadas através do método gravimétrico, onde amostras de batata-doce foram desidratadas até o fim do processo (27 minutos de secagem), transformadas em pó com o auxílio de um moinho de facas (TECNAL, Modelo - TE 631/2, Brasil) e armazenadas em potes plásticos. Os pós foram armazenados em dessecador com pentóxido de fósforo por 60 dias, à temperatura ambiente. Após este período, amostras de aproximadamente 1,0 g foram pesadas em balança analítica (Shimadzu, modelo ATX224, Japão) e acondicionados em recipientes hermeticamente fechados contendo soluções salinas saturadas de sais com atividade de água pré-determinada (Tabela 1). Foram acondicionados três potes em cada recipiente, sendo os recipientes armazenados em temperatura controlada ( $25^{\circ} \text{C}$ ) (GREENSPAN, 1997).

**Tabela 1** - Atividade de água das soluções salinas saturadas a temperatura de 25°C

<b>Solução salina saturada</b>	<b>Atividade de água (<math>a_w</math>) (25°C)</b>
Cloreto de lítio	0,117
Cloreto de magnésio	0,328
Carbonato de potássio	0,438
Nitrato de magnésio	0,529
Nitrito de sódio	0,643
Cloreto de sódio	0,753
Sulfato de amônio	0,804
Cloreto de potássio	0,843
Cloreto de bário	0,907

Os potes contendo as amostras foram pesados em balança analítica (Shimadzu, Modelo - AY220, Filipinas) semanalmente até a estabilização de sua massa. A ausência de variação na massa das amostras indica que a atividade de água do pó de batata-doce está em equilíbrio com o ambiente do recipiente. Após atingido o equilíbrio (6 semanas), o conteúdo dos potes foi transferido para cadinhos de alumínio, para determinação da umidade pelo método gravimétrico a 105 °C por 24 h.

Para a determinação da curva da isoterma de sorção, ajustou-se aos dados experimentais o modelo de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer), conforme apresentado na Equação 11:

$$X_{eq} = \frac{(C-1).K.a_w.X_m}{1+(C-1).K.a_w} + \frac{K.a_w.X_m}{1-K.a_w} \quad (11)$$

na qual  $X_{eq}$  é a umidade de equilíbrio, expressa em base seca,  $X_m$  é a umidade absorvida na monocamada,  $C$  é a constante de Guggenheim e  $K$  é a constante do modelo. Os parâmetros do modelo de GAB foram estimados usando regressão não linear através da determinação dos mínimos quadrados, com o auxílio do software MATLAB (R2018a).

### 3.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DIELÉTRICAS

Para realizar a determinação das propriedades dielétricas das amostras de batata-doce, utilizou-se um sistema de sonda dielétrica de alta temperatura (Keysight Technologies, Modelo - N1501A-101, EUA), conectado a um analisador vetorial de rede de mão RF FieldFox (Keysight Technologies, Modelo - N9923A, EUA (Figura 9). A sonda dielétrica de alta temperatura realiza medições na faixa de frequência de 200 MHz a 20 GHz, sendo as propriedades dielétricas calculadas a partir do coeficiente de reflexão do material em contato com a base da sonda, onde está localizado o sensor. Antes da realização das medições, o sistema

deve ser calibrado com a sonda exposta ao ar (temperatura ambiente), acoplada ao *High temperature short block* (bloco de curto circuito para alta temperatura) mostrado na Figura 10 e em contato com água deionizada a uma temperatura de 24°C.

**Figura 9** - Analisador vetorial de rede de mão RF FieldFox.



Fonte: Keysight technologie(2015).

**Figura 10** - Sonda para medição de propriedades dielétricas e bloco de calibração (*High temperature short block*).



Fonte: Keysight technologie (2015).

O coeficiente de reflexão é expresso em termos de permissividade relativa complexa. A leitura é realizada através de um software que acompanha o sistema (Keysight Materials Measurement Suite), sendo fornecidos também os valores de permissividade dielétrica e o fator de perda dielétrica. Neste estudo, foram analisadas as frequências de 915 MHz e 2450 MHz e a profundidade de penetração das micro-ondas foi calculada, conforme a Equação 6, descrita no item 3.6.

### 3.4.1 Determinação das propriedades dielétricas de batatas-doces *in natura* e branqueadas

Para a determinação das propriedades dielétricas das amostras *in natura* e branqueadas, foi utilizado um suporte de polipropileno sustentado por uma plataforma elevatória do tipo tesoura. Um total de 6 fatias padronizadas foram empilhadas sobre o suporte de polipropileno e pressionadas contra a sonda dielétrica, previamente calibrada, ao ajustar-se a plataforma elevatória. As medidas das propriedades dielétricas foram realizadas em sextuplicata de amostras e em triplicata de leitura para cada amostra.

### 3.4.2 Determinação das propriedades dielétricas de batatas-doces desidratadas

O método de determinação das propriedades dielétricas utilizado para as amostras *in natura* e branqueadas é inadequado para as amostras desidratadas, pois durante a secagem ocorre a deformação da fatia, que deixa de ser plana, bem como a formação de bolsões de ar na estrutura da amostra. A ocorrência de ar no interior das amostras e entre as fatias gera um distúrbio na leitura das propriedades dielétricas, pois o sensor passa a captar as constantes do ar e da amostra.

Para a determinação das propriedades dielétricas com a mínima interferência do ar, as amostras desidratadas foram desidratadas até o ponto final da secagem e trituradas em moinho de facas (TECNAL, Modelo - TE 631/2, Brasil) até a obtenção de um pó. Em seguida, as amostras foram peneiradas utilizando-se uma peneira padronizada de 48 mesh. Utilizando uma balança analítica (Shimadzu, Modelo - AY220, Filipinas), foram pesadas 25 gramas do pó dispostas em placas de vidro. As placas de vidro foram então armazenadas em recipientes de vidro contendo soluções salinas (Tabela 2) para controle da umidade relativa, como descrito no item 4.3.9 da isoterma de sorção.

**Tabela 2** - Atividade de água de soluções salinas saturadas a temperatura de 25 °C acondicionadas para realização das propriedades dielétricas.

Solução salina saturada	Atividade de água ( $a_w$ ) (25°C)
Acetato de potássio	0,225
Cloreto de magnésio	0,327
Carbonato de potássio	0,438
Nitrato de magnésio	0,529
Nitrito de sódio	0,643
Cloreto de sódio	0,753

Para a leitura das amostras de batata-doce desidratada em pó, utilizou-se um recipiente transparente (proveta graduada de 50 mL, cortada a uma altura de 30 mm a partir da base). Neste recipiente, foram transferidas de 5 a 7 g da amostra em pó, padronizando visualmente o conteúdo conforme o volume indicado na escala graduada da proveta. As amostras com maior umidade apresentam maior massa específica aparente, sendo 5 g suficientes para atingir a altura do sensor, enquanto as amostras com menor umidade apresentam menor massa específica aparente tornando-se necessário compactar até 7g de amostra para atingir uma faixa semelhante de volume. Com a finalidade de expulsar o ar aprisionado entre os grãos do pó, as amostras foram compactadas manualmente, sobre uma superfície reta, com uma distância máxima de 2 cm entre a superfície e o fundo da proveta. Para a padronização do método, foi estabelecido um total de 100 batidas entre a proveta e a superfície para que a altura do leito se mantivesse constante. Em seguida, a proveta é posicionada na superfície de uma plataforma elevatória do tipo tesoura e sob a sonda do sistema de medição de propriedades dielétricas, sendo então elevada de forma que o leito da amostra seja pressionado contra a sonda dielétrica.

### 3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para os resultados obtidos durante as análises de cor, propriedades dielétricas, foram realizadas análises estatísticas utilizando o software *Statistica 7.0* (StatSoft, Tulsa, Estados Unidos) realizando análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey a 95% de confiança.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CINÉTICAS DE SECAGEM

A Tabela 3 apresenta o teor médio de umidade ( $X_{bs}$ ), a porcentagem de umidade em base úmida ( $X_{bu}$ ) e a atividade de água ( $a_w$ ) para as amostras de batata-doce *in natura*, branqueadas e após 27 min de secagem.

**Tabela 3** - Valores médios e desvio-padrão dos resultados experimentais para umidade em base seca ( $X_{bs}$ ), em base úmida ( $X_{bu}$ ) e atividade de água ( $a_w$ ) de amostras de batata-doce.

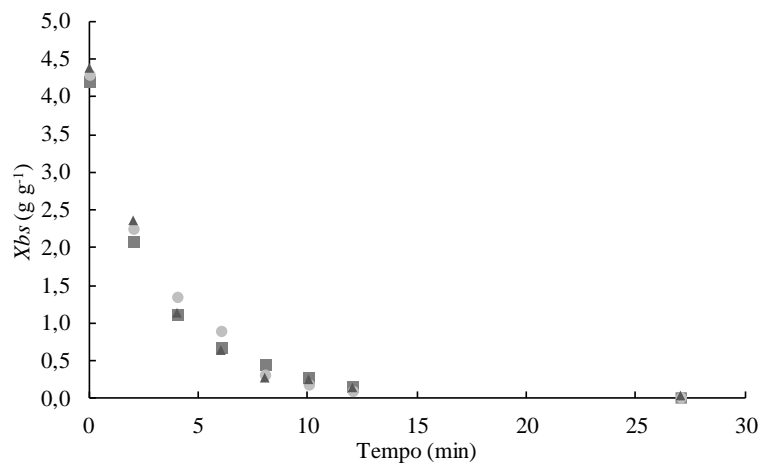
Amostras	$X_{bs}$	$X_{bu}$	$a_w$
<i>In natura</i>	3,5591±0,2401	78,07% ± 1,2%	0,993±0,002
Branqueada	4,2968±0,3797	81,12% ± 1,4%	0,994±0,002
Seca	0,0279±0,0063	2,7 ± 0,6 %	0,262±0,041

Valores semelhantes para umidade das batata-doce *in natura* foram reportados por Osundahunsi et al. (2003). Após o branqueamento as amostras apresentaram valores mais elevados de umidade em comparação com as amostras *in natura*, pois durante o branqueamento, a troca de calor entre a água a 97°C e a amostra ocasiona a cocção da superfície da fatia de batata doce, caracterizada pela gelatinização do amido presente, aprisionando moléculas de água em sua estrutura.

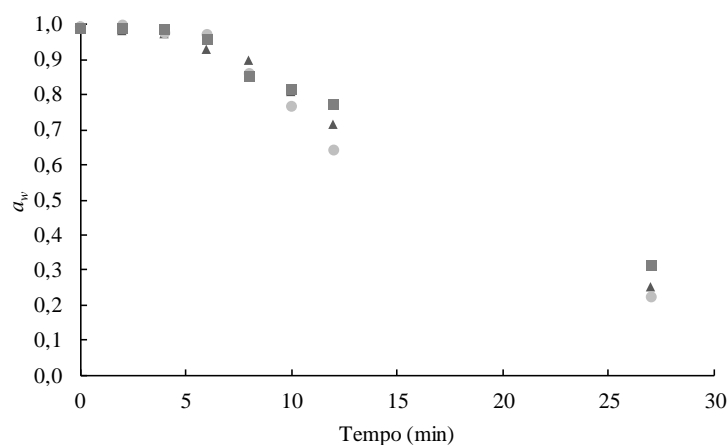
As amostras de batata-doce secas apresentaram umidade final média de  $2,7 \pm 0,6$  % (base úmida). O produto resultante da secagem das amostras de batata-doce apresenta valores de umidade em conformidade com a RDC n° 272, de 22 de setembro de 2005 (ANVISA), que estabelece um teor máximo de umidade (em base úmida) de 12% para produtos vegetais secos ou desidratados. Além disso, o baixo valor de atividade de água encontrado para os *chips* de batata doce favorece a estabilidade do produto frente à deterioração, pois são desaceleradas as atividades metabólicas.

Nas Figuras 11, 12 e 13 estão apresentadas as curvas de secagem, da evolução temporal da umidade média em base seca ( $X_{bs}$ ), da atividade de água ( $a_w$ ), da temperatura das amostras e da potência aplicada durante a secagem por micro-ondas a vácuo (MWVD). O processo de secagem foi realizado em triplicata obtendo boa reprodutibilidade.

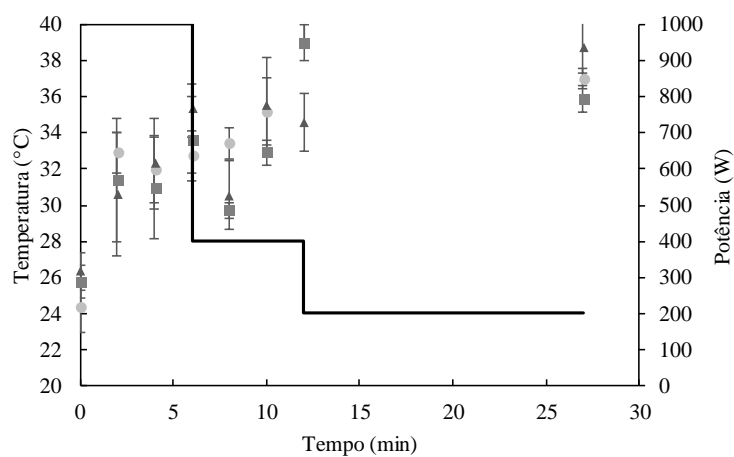
**Figura 11** - Evolução temporal umidade média em base seca das amostras de batata-doce durante o processo de secagem em micro-ondas a vácuo.



**Figura 12** - Evolução temporal da média da atividade de água das amostras de batata-doce durante o processo de secagem por micro-ondas a vácuo.



**Figura 13** - Evolução temporal da temperatura das amostras e da potência (—) aplicada durante a secagem.





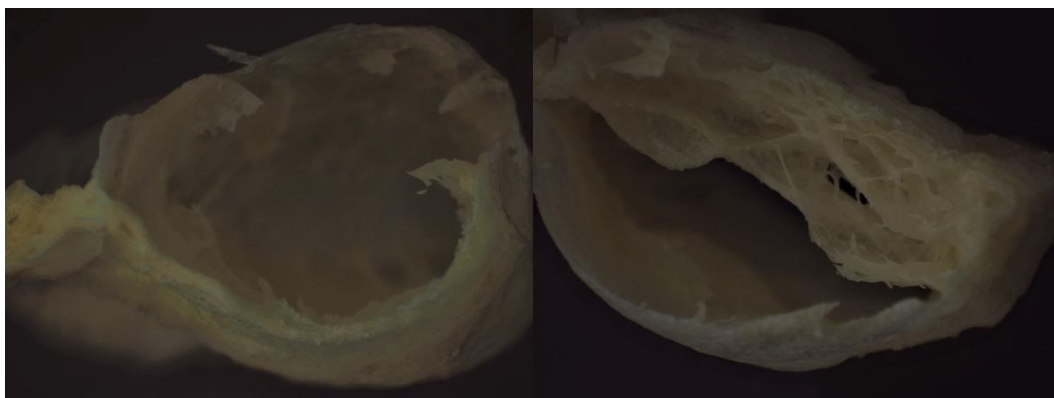
Segundo Zhang et al. (2006) a secagem por micro-ondas apresenta três períodos de secagem, um período de aquecimento da amostra até atingir a temperatura de ebulição da água, um período de secagem à taxa constante e um período de taxa decrescente de secagem. Na secagem de batata-doce por micro-ondas a vácuo, não foi possível observar o período de aquecimento, devido ao rápido aumento da temperatura e a menor temperatura de ebulição da água em baixas pressões. Analisando-se as Figuras 11, 12 e 13 em conjunto, foi possível verificar a existência de dois períodos de secagem: um período inicial associado à evaporação da água livre, onde a  $a_w$  permanece constante próxima de 1. O período inicial consiste na conversão das micro-ondas em energia térmica, fornecendo o calor latente para a vaporização da água livre. Esse período apresentou um período de temperatura aproximadamente ( $\approx 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), valor próximo da temperatura de ebulição da água para pressão de 4 kPa ( $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), obtendo duração de 4 minutos, sendo responsável pela maior quantidade de água evaporada (remoção de 75% da umidade inicial) e uma taxa média de secagem de  $0,78\text{ g g}^{-1}\text{ min}^{-1}$ . Após o período inicial foi possível observar um período de taxa decrescente, com redução gradativa da  $a_w$  (Figura 12). Durante todo o processo de secagem a temperatura das amostras ficou abaixo de  $40^{\circ}\text{C}$ , devido a modulação da potência, sendo essa temperatura amena de secagem uma das principais vantagens associadas à secagem por micro-ondas a vácuo (CHONG et al., 2013).

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

### 4.2.1 Microscopia óptica

As imagens obtidas através da microscopia óptica das amostras batatas-doces desidratadas por micro-ondas a vácuo (Figura 14) indicam uma estrutura altamente porosa.

**Figura 14** - Imagens obtidas por microscopia óptica da estrutura interna (fratura) de amostras de batata-doce desidratada por micro-ondas a vácuo.

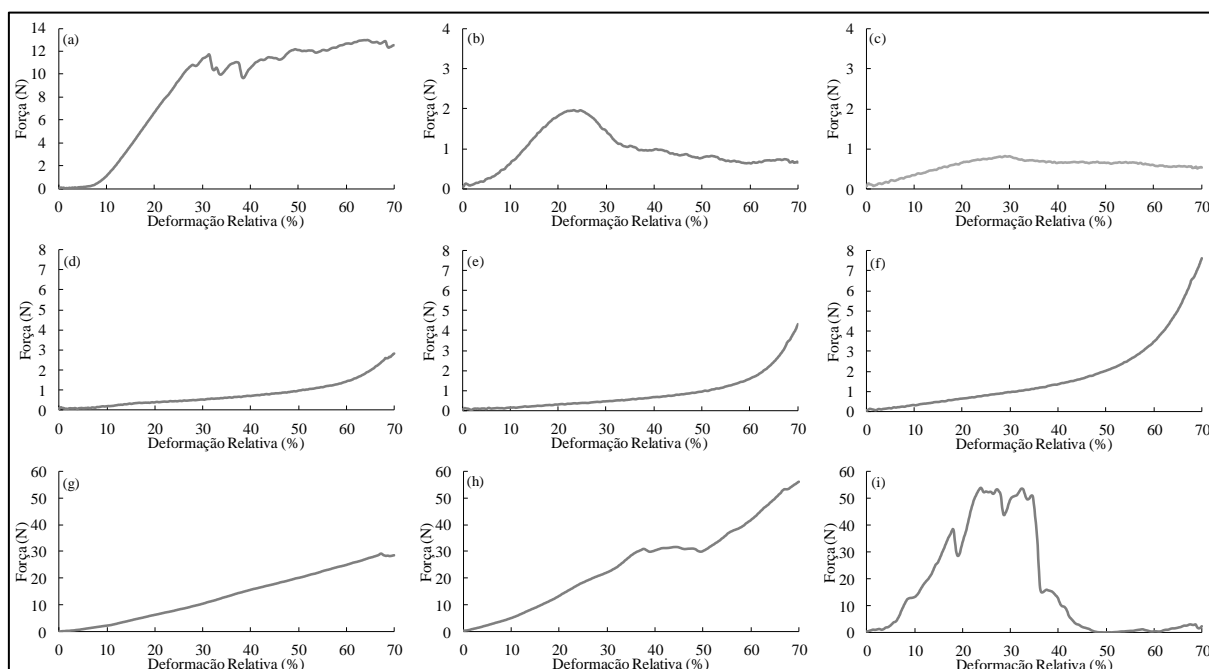


A presença de bolsões de ar na estrutura interna das amostras são resultantes do *puffing effect*, efeito característico de alimentos desidratados por micro-ondas a vácuo. Esse efeito ocorre devido aquecimento volumétrico causado pelas micro-ondas e a baixa pressão, forçando a saída de vapor do interior para a superfície do alimento, ocasionando a expansão do poro (SCAMAN e DURANCE, 2014). Na produção de *chips* de batata-doce, o *puffing* é um fenômeno desejável, uma vez que os poros gerados contribuem para a característica crocante e quebradiça do produto final (MONTEIRO et al., 2016).

#### 4.2.2 Propriedades mecânicas

A avaliação da textura das amostras de batata-doce durante o processo de desidratação foi realizada analisando-se a resistência de sua estrutura em teste de perfuração. Na Figura 15 estão apresentados os resultados da força desenvolvida em função da deformação relativa da sonda na amostra.

**Figura 15** - Curvas força-deformação das amostras de batata-doce (a) *in natura*; (b) branqueadas e submetidas ao processo de secagem por micro-ondas a vácuo por (c) 2 minutos; (d) 4 minutos; (e) 6 minutos; (f) 8 minutos; (g) 10 minutos; (h) 12 minutos e; (i) 27 minutos.



A presença de picos de força nas curvas de força-deformação pode ser relacionada com a crocância de produtos desidratados. Sabendo que produtos crocantes são aqueles cuja estrutura cede (quebra) com facilidade quando uma força é exercida, a crocância pode ser mensurada a

partir do número e intensidade de picos de força da curva força-deformação (LAURINDO e PELEG, 2008).

Analisando as curvas de força-deformação, observa-se que as amostras de batata-doce sofrem uma variação de textura perceptível durante o processo de secagem, passando de um produto levemente quebradiço (*in natura*) até um produto crocante característico (27 min). Na Figura 15, é possível observar que a amostra *in natura* é mais quebradiça em comparação com a branqueada, apresentando maior número de irregularidades na curva de força-deformação. Isso ocorre porque durante o branqueamento, a estrutura interna da batata-doce é modificada em decorrência da gelatinização do amido tornando-a mais deformável (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010). Durante o processo de secagem, as amostras com umidade elevada são facilmente deformáveis, dessa forma a resistência à deformação está diretamente relacionada ao acúmulo de material sólido sob a sonda.

Com a diminuição da umidade das amostras de batata-doce desidratada, observa-se um aumento da resistência à penetração, mas sem a presença de picos de força até 10 min de secagem. Os primeiros picos de força com baixa amplitude, representados por irregularidades nos gráficos de força-deformação foram detectados com 12 min de secagem. As curvas de força-deformação para a amostra desidratada após 27 min apresentam um maior número de picos com grande amplitude, característicos de produtos secos, crocantes com estrutura interna quebradiça.

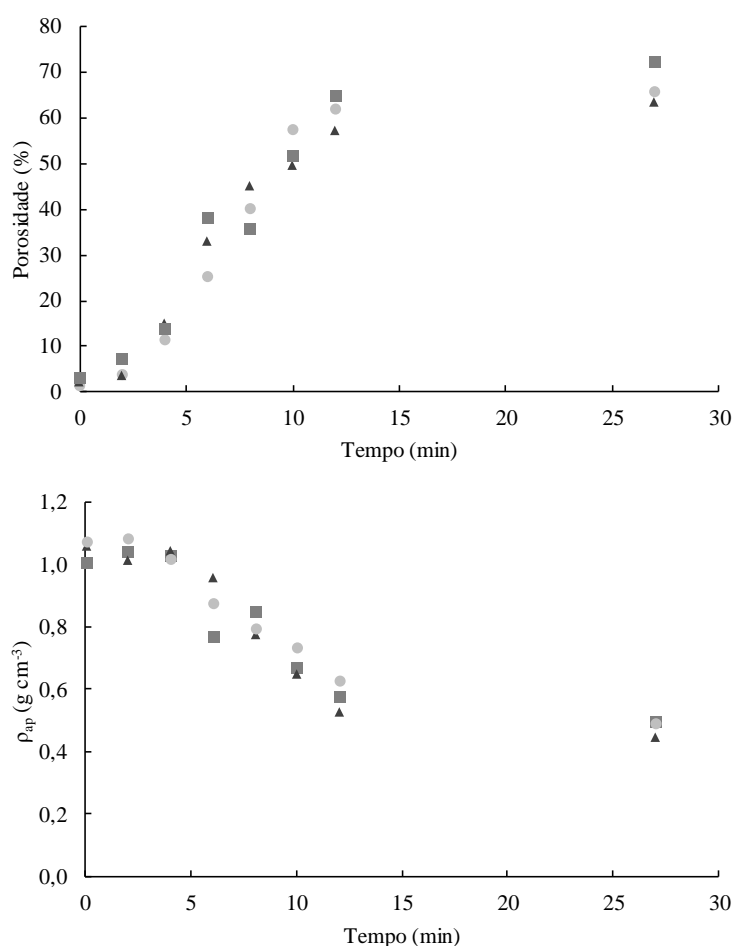
#### 4.2.3 Porosidade e Massa específica aparente

A Figura 16 apresenta a evolução da porosidade ( $\varepsilon$ ) e da massa específica aparente ( $\rho_{ap}$ ) das amostras de batata-doce durante o processo de secagem em relação ao tempo de processo e à umidade da amostra analisada.

Para as amostras de batata-doce *in natura*, foram encontrados valores de massa específica aparente e porosidade de  $1,077 \pm 0,007 \text{ g cm}^{-3}$  e  $4,3 \pm 2,1 \%$ , respectivamente. Constata-se que as amostras branqueadas sofrem uma diminuição em sua porosidade ( $\varepsilon = 2,2 \pm 0,7 \%$ ) em decorrência da absorção de água e da alteração de sua estrutura interna. Quando imersa em água a temperatura elevada ( $97 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), o amido presente nas camadas externas das fatias de batata doce gelatiniza, formando uma rede tridimensional que aprisiona moléculas de água, resultando em uma estrutura mais densa e menos porosa (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010).

Com a evolução da secagem do alimento por micro-ondas, a porosidade das amostras é aumentada, enquanto sua massa específica aparente diminui. Tal comportamento deve-se à vaporização das moléculas de água aprisionadas no interior da estrutura das amostras durante o aquecimento por micro-ondas a vácuo. Como resultado da expansão do gás na mudança de fase, ocorre a dilatação de poros no alimento, que são preenchidos de ar após a descompressão da câmara de vácuo. Ao término do processo de secagem (27 min), a porosidade das amostras aumentou para  $67,5 \pm 8,6 \%$ , enquanto sua massa específica aparente foi reduzida para  $0,456 \pm 0,119 \text{ g cm}^{-3}$ . Sendo assim, a secagem por micro-ondas a vácuo é capaz de produzir *chips* de batata-doce altamente porosos, característica desejável que contribui positivamente para os atributos sensoriais e de textura (crocância).

**Figura 16** - Evolução temporal (a) da porosidade e (b) da massa específica aparente das amostras de batata-doce durante o processo de secagem por micro-ondas a vácuo.

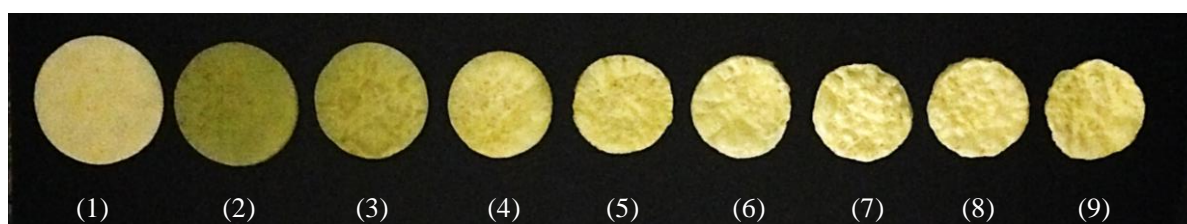


#### 4.2.4 Cor

Durante o processo de secagem, é comum a ocorrência de alterações na coloração das hortaliças. A cor do produto desidratado costuma ser um parâmetro de grande importância para a aceitação do produto pelo consumidor, tendo maior aceitação a cor mais próxima do produto *in natura*.

Na Figura 17 observamos a alteração sutil da coloração das amostras de batata-doce *in natura*, branqueada e secas por micro-ondas a vácuo. Já na Tabela 6 encontra-se os valores médios dos parâmetros de cor da escala CIELab ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  e  $\Delta E^*$ ), para amostras *in natura* e retiradas em pontos distintos do processo de secagem. Os parâmetros foram avaliados estatisticamente através do teste de Tuckey para a determinação de sua significância.

**Figura 17** - Fotografia das batatas retiradas em diferentes estágios de secagem por MWVD. Amostras: (1) *In natura*, (2) branqueada, (3) 2 min, (4) 4 min, (5) 6 min, (6) 8 min, (7) 10 min, (8) 2 min, (9) 27 min.



**Tabela 4** - Parâmetros de cor ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $\Delta E^*$ ) da batata-doce *in natura*, branqueadas e das batatas-doces durante a secagem por MWVD.

Amostras	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E^*$
<i>In natura</i>	$83,45 \pm 1,36^{d**}$	$-2,24 \pm 0,94^c$	$30,65 \pm 3,00^b$	-
Branqueadas	$57,09 \pm 2,17^a$	$-7,21 \pm 0,74^a$	$24,16 \pm 1,60^a$	$27,66 \pm 2,05^b$
2 min	$73,98 \pm 3,83^b$	$-5,21 \pm 0,57^b$	$36,16 \pm 2,75^c$	$12,02 \pm 2,36^a$
4 min	$77,28 \pm 2,38^{cb}$	$-4,66 \pm 0,43^b$	$37,54 \pm 2,12^{cd}$	$9,74 \pm 2,56^a$
6 min	$80,49 \pm 2,33^{cd}$	$-4,94 \pm 0,64^b$	$39,70 \pm 2,41^d$	$10,15 \pm 2,48^a$
8 min	$80,17 \pm 3,79^{cd}$	$-4,85 \pm 0,36^b$	$39,59 \pm 2,29^d$	$10,58 \pm 2,00^a$
10 min	$81,12 \pm 1,3^d$	$-4,74 \pm 0,49^b$	$40,41 \pm 1,81^d$	$10,46 \pm 1,61^a$
12 min	$80,24 \pm 1,73^{cd}$	$-4,52 \pm 0,40^b$	$39,66 \pm 1,94^d$	$9,94 \pm 2,11^a$
27 min	$77,67 \pm 3,09^c$	$-4,51 \pm 0,63^b$	$38,03 \pm 1,95^{cd}$	$10,04 \pm 2,26^a$

\*\*Letras diferentes representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

Analisando-se o parâmetro  $L^*$  em conjunto com a comparação visual da Figura 17, é possível observar que as amostras branqueadas sofrem um escurecimento em relação às amostras *in natura* em decorrência do processo de gelatinização da matriz amilácea e absorção

de água pela fatia de batata-doce. Entretanto, após a secagem por micro-ondas a vácuo, as amostras de batata-doce voltam a apresentar uma coloração mais clara (maiores valores de  $L^*$ ).

O parâmetro  $\Delta E^*$  representa a variação total da cor das amostras de batata-doce. É possível constatar que as amostras secas por micro-ondas a vácuo apresentam pouca variação em sua coloração quando comparadas às amostras branqueadas (0 min), sendo uma comprovação da uniformidade do processo de secagem. De acordo com os dados apresentados na Tabela 6, as amostras secas não apresentaram diferenças significativas ( $p \leq 0,05$ ) dos parâmetros  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $\Delta E^*$ , durante a secagem. Sendo assim, as amostras de batata-doce desidratadas por micro-ondas a vácuo apresentam coloração uniforme e similar ao vegetal *in natura*, com ausência de partes queimadas.

#### 4.2.5 Isotermas de Sorção

Estão dispostos na Tabela 5 os valores de umidade determinados experimentalmente para as amostras de batata-doce em pó, após atingirem o estado de equilíbrio com a umidade relativa do recipiente contendo a solução salina saturada.

**Tabela 5** - Umidades de equilíbrio das amostras de batata-doce desidratadas acondicionadas em diferentes umidades relativas.

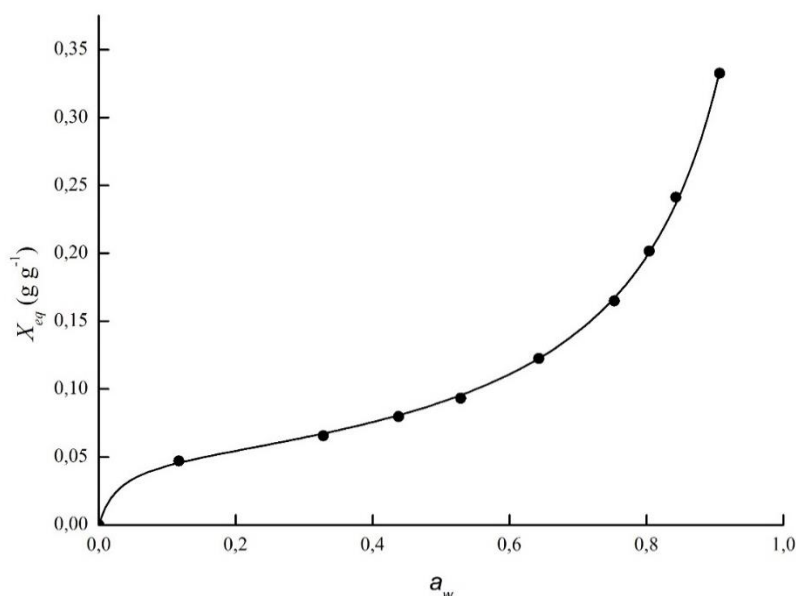
<b>Solução salina saturada</b>	<b>Atividade de água</b>	<b>Umidade de equilíbrio (Xbs)</b>
Cloreto de lítio	0,117	0,0471±0,0060
Cloreto de magnésio	0,328	0,0657±0,0016
Carbonato de potássio	0,438	0,0798±0,0003
Nitrato de magnésio	0,529	0,0932±0,0021
Nitrito de sódio	0,643	0,1226±0,0031
Cloreto de sódio	0,753	0,1651±0,0010
Sulfato de amônio	0,804	0,2016±0,0040
Cloreto de potássio	0,843	0,2413±0,0064
Cloreto de bário	0,907	0,3326±0,0145

O modelo de Guggenheim, Anderson e de Boer (GAB) foi ajustado aos dados experimentais de isoterma de sorção das batatas-doces desidratadas (Figura 19). O ajuste do modelo de GAB apresentou bom ajuste, com  $R^2 = 0,999$  e  $RMSE = 0,003$  (Tabela 6).

Avaliando a isoterma de sorção obtida através dos dados de umidade atividade de água, é possível identificar que se trata de uma isoterma do tipo II (BRUNAUER, 1938). Isotermas do tipo II exibem um ponto de inflexão correspondente à completa formação da monocamada e o começo da multicamada. As isotermas do tipo II são características de sólidos não porosos

finamente divididos ou, então, contendo macroporos (FULVIO, 2009). A ausência de microporos (diâmetro inferior a 2 nm) na amostra de batata-doce seca por micro-ondas a vácuo resulta em uma adsorção estritamente superficial, que se torna mais lenta quando os sítios mais ativos do sólido são ocupados. Na região final da curva ocorre um aumento rápido da quantidade de água adsorvida em função do aumento da pressão parcial de água (TEIXEIRA et al., 2001).

**Figura 18** - Isotermas de sorção das batata-doce desidratadas por micro-ondas a vácuo. Dados experimentais (●). O modelo de GAB ajustado a curva está representado por linha contínua.



**Tabela 6** - Parâmetros estimados do modelo de GAB ajustado aos dados experimentais de sorção de água da batata-doce seca por micro-ondas a vácuo.

Parâmetro	Valor
$X_m$ (g g <sup>-1</sup> b. s.)	0,049
K	0,941
C	38,09
R <sup>2</sup> ajustado	0,999
RMSE	0,003

O valor de umidade de monocamada ( $X_m$ ) encontrado para as amostras de batata-doce secas por micro-ondas a vácuo é de 0,049 g g<sup>-1</sup> (bs), valor similar ao encontrado (0,059 g g<sup>-1</sup> bs) por Wang e Brennan (1990) para batata. A determinação da umidade de monocamada estima a quantidade de água que está fortemente adsorvida no alimento, sendo um parâmetro importante para determinar estabilidade de produtos desidratados (RAHMAN, 2008). Dessa forma, a umidade de monocamada indica o valor de umidade em que o alimento possui máxima

estabilidade frente a reações físico-químicas e enzimáticas, promovendo a extensão de sua vida útil (LABUZA, 1975).

#### 4.3 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS

A análise das propriedades dielétricas foi realizada para as amostras de batata-doce *in natura*, branqueadas e secas em pó, sendo estas últimas armazenadas em soluções salinas de diferentes umidades relativas. A Tabela 7 apresenta os valores de atividade de água ( $a_w$ ), umidade ( $X_{bu}$ ), constante dielétrica ( $\epsilon'$ ), constante de perda ( $\epsilon''$ ) e profundidade de penetração ( $dp$ ) para a água deionizada e as amostras de batata, analisadas sob frequências de 915 e 2450 MHz.

Os valores encontrados para as propriedades dielétricas ( $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ ) apresentaram boa reprodutibilidade de leitura em função da frequência. Conforme indicado na Tabela 7, as amostras de batata-doce *in natura* apresentaram constante dielétrica  $\epsilon' = 53,7 \pm 2,4$  e constante de perda  $\epsilon'' = 16,3 \pm 1,3$  para frequências de 2,45 GHz. Valores semelhantes foram obtidos por Nelson (1980), que estudou as propriedades dielétricas de diferentes cultivares de batata-doce pela técnica de linha coaxial de curto-circuito, utilizando frequência de 2,45 GHz. Observa-se que a constante dielétrica da água e das amostras de batata-doce diminui com o aumento da frequência, comportamento também observado por NELSON e TRABELSI (2008) em estudos com diferentes frutas e legumes.

A partir dos dados da Tabela 7, é possível identificar que o valor das propriedades dielétricas das amostras de batata-doce diminui gradualmente com a diminuição da umidade e atividade de água. Este fenômeno ocorre devido à grande dependência das propriedades dielétricas em relação ao teor de água livre no alimento, resultante do efeito de polarização resultante da orientação das moléculas de água com o campo eletromagnético imposto, uma vez que as mesmas possuem momentos de dipolo permanentes (NELSON e TRABELSI, 2004).

A presença de água livre no alimento influencia as propriedades dielétricas, uma vez que a constante dielétrica da água é bastante alta ( $\epsilon' = 78$ , a 25°C e 2,45 GHz). Sendo assim, a diminuição da constante dielétrica do início do processo ( $\epsilon' = 63,5 \text{ F m}^{-1}$  a 2,45 GHz) até o ponto final de secagem ( $\epsilon' = 2,4 \text{ F m}^{-1}$  a 2,45 GHz) é resultante da diminuição da água livre durante a secagem. De acordo com Schubert (2005), as propriedades dielétricas decrescem rapidamente com a diminuição da umidade até que um ponto de umidade crítica seja atingido, caracterizado pela ausência de água livre no alimento, sendo a água restante (ligada) pouco influenciada pela incidência das ondas eletromagnéticas. Na Tabela 7, pode-se observar que



todas as amostras armazenadas em umidades relativas menores ou iguais a 75,3% atingiram a umidade crítica, ou seja, grande parte da água presente nas amostras está ligada e as propriedades dielétricas deixam de ser influenciadas pela umidade. Ainda, o valor das propriedades medidas está muito próximo ao limite de sensibilidade do sistema de medição. Dessa forma, não se observou diferença nas propriedades dielétricas das amostras desidratadas.

**Tabela 7** - Propriedade dielétricas e profundidade de penetração das micro-ondas da água, das batatas *in natura*, branqueada e secas em pó e acondicionada em soluções salinas de diferentes umidades relativas, nas frequências de 915 e 2450 MHz. Atividade de água ( $a_w$ ) e umidade em base úmida ( $Xbu$ ) das amostras.

Amostras	$a_w$	$Xbu$ (%)	$\varepsilon'$ (F m <sup>-1</sup> )		$\varepsilon''$		$dp$ (cm)	
			915 MHz	2450 MHz	915 MHz	2450 MHz	915 MHz	2450 MHz
(a) Água deionizada	1,000 ± 0,001	-	78,7 ± 0,1 <sup>d*</sup>	77,6 ± 0,1 <sup>d</sup>	3,6 ± 0,0 <sup>b</sup>	9,5 ± 0,1 <sup>b</sup>	12,8 ± 0,1 <sup>bc</sup>	1,8 ± 0,0 <sup>a</sup>
(b) Batata branqueada	0,994 ± 0,002	80,5 ± 1,0	66,7 ± 2,0 <sup>c</sup>	63,5 ± 2,0 <sup>c</sup>	14,0 ± 1,1 <sup>c</sup>	14,3 ± 0,5 <sup>c</sup>	3,1 ± 0,3 <sup>a</sup>	1,1 ± 0,0 <sup>a</sup>
(c) Batata <i>in natura</i>	0,993 ± 0,002	74,2 ± 0,2	57,1 ± 2,1 <sup>b</sup>	53,7 ± 2,4 <sup>b</sup>	21,9 ± 1,7 <sup>d</sup>	16,3 ± 1,3 <sup>d</sup>	1,8 ± 0,1 <sup>a</sup>	0,9 ± 0,1 <sup>a</sup>
(d) UR=75,3 %	0,751 ± 0,000	14,7 ± 0,0	2,7 ± 0,3 <sup>a</sup>	2,4 ± 0,3 <sup>a</sup>	0,6 ± 0,1 <sup>a</sup>	0,3 ± 0,1 <sup>a</sup>	16,1 ± 2,6 <sup>bcd</sup>	9,4 ± 2,3 <sup>b</sup>
(e) UR=64,3 %	0,643 ± 0,001	10,3 ± 0,1	2,6 ± 0,3 <sup>a</sup>	2,5 ± 0,1 <sup>a</sup>	1,0 ± 0,4 <sup>a</sup>	0,3 ± 0,1 <sup>a</sup>	12,1 ± 7,7 <sup>b</sup>	10,8 ± 2,7 <sup>b</sup>
(f) UR=52,9 %	0,542 ± 0,001	7,6 ± 0,2	2,5 ± 0,5 <sup>a</sup>	2,4 ± 0,4 <sup>a</sup>	0,6 ± 0,3 <sup>a</sup>	0,2 ± 0,1 <sup>a</sup>	17,0 ± 7,7 <sup>cd</sup>	16,9 ± 9,0 <sup>c</sup>
(g) UR= 43,8 %	0,459 ± 0,002	5,6 ± 0,1	2,8 ± 0,3 <sup>a</sup>	2,7 ± 0,1 <sup>a</sup>	0,6 ± 0,2 <sup>a</sup>	0,3 ± 0,0 <sup>a</sup>	14,9 ± 4,6 <sup>bc</sup>	12,1 ± 1,5 <sup>b</sup>
(h) UR=32,7 %	0,486 ± 0,000	4,3 ± 0,0	2,3 ± 0,2 <sup>a</sup>	2,3 ± 0,2 <sup>a</sup>	0,4 ± 0,0 <sup>a</sup>	0,2 ± 0,0 <sup>a</sup>	21,9 ± 2,2 <sup>e</sup>	19,5 ± 2,2 <sup>c</sup>
(i) UR=22,5 %	0,388 ± 0,001	4,1 ± 0,3	2,4 ± 0,1 <sup>a</sup>	2,4 ± 0,1 <sup>a</sup>	0,4 ± 0,0 <sup>a</sup>	0,2 ± 0,0 <sup>a</sup>	20,5 ± 2,1 <sup>de</sup>	18,6 ± 0,7 <sup>c</sup>

\*Letras diferentes representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

## 5 CONCLUSÃO

A secagem por micro-ondas a vácuo é uma alternativa para a produção de *chips* de batata-doce com estrutura porosa crocante e coloração próxima ao produto *in natura*. As amostras de batata-doce secas por este processo apresentaram baixa umidade ( $0,028 \text{ g g}^{-1} \text{ bs}$ ) e atividade de água ( $0,262$ ), garantindo a extensão da vida útil da hortaliça e fornecendo uma estrutura seca e quebradiça. Uma estrutura altamente porosa ( $67,5\%$ ) e crocante para os *chips* de batata-doce secos por micro-ondas a vácuo também foi apontada pela análise de porosidade e pelo teste de propriedades mecânicas, que resultou em curvas irregularidade de força-deformação com diversos números de picos de força. Foi possível identificar a alteração nas propriedades dielétricas das amostras de batata-doce. As amostras *in natura* apresentaram constante dielétrica de  $53,7 \pm 2,4 \text{ F m}^{-1}$ , reduzindo-se, ao final do processo, para  $2,4 \pm 0,1 \text{ F m}^{-1}$ . Sendo assim, a secagem por micro-ondas a vácuo apresenta um grande potencial para aplicação industrial, produzindo *chips* crocantes, com alta porosidade e coloração uniforme.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

O presente estudo possibilita a continuidade da linha de pesquisa para alimentos secos por micro-ondas a vácuo, sendo sugeridos os tópicos:

- a) Ajuste e aperfeiçoamento da técnica de determinação das propriedades dielétricas, aliada à elaboração de um modelo matemático que associe a variação das propriedades dielétricas e as demais propriedades físico-químicas, tais como umidade, porosidade e atividade de água;
- b) Análise nutricional com determinação da variação total no perfil vitamínico de alimentos submetidos à secagem por micro-ondas a vácuo;
- c) Determinação da vida útil do produto desidratado;
- d) Análise da viabilidade econômica e energética para o processo de secagem de batata-doce por micro-ondas a vácuo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.O.A.C. - **Association of Official Analytical Chemists**. Official methods of analysis (18th ed.). Gaithersburg, Maryland: A.O.A.C. INTERNATIONAL, 2005.

AGUILAR-REYNOSA, A.; ROMANÍ, A.; RODRÍGUEZ-JASSO, R. M.; AGUILAR, C. N.; GARROTE, G.; RUIZ, H.A. Microwave heating processing as alternative of pretreatment in second-generation biorefinery: An overview. **Energy Conversion and Management**, Vol. 136, 2007, p. – 50-65.

AGUILERA, J.M.; CHIRALT, A.; FITO, P. Food dehydration and product structure. **Trends in Food Science & Technology**, v. 14, n. 10, p. 432-437, 2003.

ALLEN, J. C.; CORBITT, A. D.; MALONEY, K. P.; BUTT, M. S.; TRUONG, V. D. Glycemic index of sweet potato as affected by cooking methods. **Open Nutrition Journal**, v. 6, p. 1-11, 2012.

BENGTSSON, N; RISMAN, P. O.; Dielectric properties of foods at 3 GHz as determined by a cavity perturbation technique. Measurements on food materials, **Journal of Microwave Power**, p.107-1231, 1971.

BHARGAVAL, N.; JAIN, R.; JOSHI, I.; SHARMAL, K.S.; Effect of Frequency and Moisture Variation on Dielectric Properties of Pearl Millet in Powder Form. **Journal Environmental Nanotechnology**. Volume 2 (2013), p. 01-05.

BRUNAUER, S; EMMET, P.H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**. Vol. 60, 1938.

CALÍN-SÁNCHEZ, A.; FIGIEL, A.; WOJDYŁO, A.; SZARYCZ, M.; CARBONELL-BARRACHINA, A. A. Drying of garlic slices using convective pre-drying and vacuum-microwave finishing drying: kinetics, energy consumption, and quality studies. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 2, p. 398-408, 2014.

CHANDRASEKARAN S.; RAMANATHAN S.; BASAK T. Microwave food processing - A review. **Food Research International**, v. 52, n.1 , p. 243–261, 2013.

COHEN, J.S.; YANG, T.C.S. Progress in food dehydration. **Trends in Food Science**

**&Technology**, v. 6, n. 1, p. 20-25, 1995.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K.L.; FENNEMA, O.R. **Química de Alimentos** de Fennema. 4ª Edição. Artmed, 2010.

DATTA, A.K.; ANANTHESWARAN, R.C. **Handbook of Microwave Technology for Food Applications**. New York: Marcel Dekker Inc., 2001.

DOMINGUEZ-TORTAJADA, E.; PLAZA-GONZALEZ, P.; DIAZ-MORCILLO, A.; BALBASTRE, J. V. Optimisation of electric field uniformity in microwave heating systems by means of multi-feeding and genetic algorithms. **International Journal of Materials and Product Technology**, v. 29, n. 1-4, p. 149-162

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Statistics of fruits and vegetables world production. Disponível em: <http://faostat.fao.org>, acessado em 20 de junho de 2017.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Séries estatísticas, tema lavouras temporárias, 1990-2014. [online] Disponível em: <http://serieestatisticas.ibge.gov.br/>. Dados consultado em 01/05/2016.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática**. Porto alegre: Artmed, 2ª ed, 2006. Desidratação.

FIGIEL, A. Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices. **Journal of Food Engineering**, v. 94, n. 1, p. 98-104, 2009.

FULVIO, P. F.; Synthesis and characterization of ordered mesoporous inorganic nanocomposite materials. **Doctoral thesis**. Ohio, 2009.

GEANKOPLIS, C.J. **Transport Processes and Unit Operations**, 3 ed., New Jersey: Inc. Prentice Hall, 1993.

GOLDBLITH, S. A. Basic principles of microwaves and recent developments. **Advances in food research**, v. 15, p. 277-301, 1966.

GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. **Journal of Research of the National Bureau of Standards – Physics and Chemistry**. v. 81, p. 89–96, 1977.

GUNASEKARAN, S. Pulsed microwave-vacuum drying of food materials. **Drying Technology**, v. 17, n. 3, p. 395-412, 1999.

HOLTZ, E.; AHRNÉ, L.; RITTENAUER, M.; RASMUSON, A. Influence of dielectric and sorption properties on drying behaviour and energy efficiency during microwave convective drying of selected food and non-food inorganic materials. **Journal of Food Engineering**, v. 97, n. 2, p. 144-153, 2010.

HORTIBRASIL. **Instituto Brasileiro de Qualidade em Horticultura**. Normas de Classificação - batata-doce - Programa Brasileiro para a Modernização da Horticultura. São Paulo, v. 12, n. 12, 2014.

ISHIDA, H.; SUZUNO, H.; SUGIYAMA, N.; INNAMI, S.; TADOKORO, T.; MAEKAWA, A. Nutritive evaluation on chemical components of leaves, stalks and stems of sweet potatoes (*Ipomoea batatas* poir). **Food Chemistry**, v. 68, n. 3, p. 359-367, 2000.

JAYARAMAN, K. S.; GUPTA, D. K. **Handbook of Industrial Drying**. Cap. 25: Drying of Fruit and Vegetables. Editado por MUJUMDAR, A. S. Taylor & Francis Group, LLC, p. 612-633, 2014.

KARAM, M. C.; PETIT, J.; ZIMMER, D.; DJANTOU, E. B.; SCHER, J. Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 188, p. 32-49, 2016.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES (2015). Keysight N1501A. Dielectric Probe Kit 10 MHz to 50 GHz - Technical Overview. Disponível em: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/59920264EN.pdf?id=2605692>. Acessado em 22 de janeiro de 2018.

KOMAROV, V.; WANG, S.; TANG, J. Permittivity and measurements. Encyclopedia of RF and microwave engineering, 2005.

LABUZA, T.P. Sorption Phenomena in Foods: Theoretical and Practical Aspects. **Theory, Determination and Control of Physical Properties of Food Materials**. Series in Food Material Science, vol 1. Springer, Dordrecht, 1975.

LABUZA, T.P.; TANNENBAUM, S.R.; KAREL, M. Water content and stability of low

moisture and intermediate moisture foods. **Journal of Food Technology**, 24, 543–550, 1970.

LAURINDO, J.B.; PORCIUNCULA, B.D.A.; ZOTARELLI, M.F. Processo de secagem por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) para obtenção de alimentos desidratados crocantes. **Brazilian Patent** PI 017110000045 filed January 24, 2011.

LAURINDO, J.B.; PELEG, M. Mechanical characterization of shredded wheat. **Journal of texture studies**, v. 39, n. 5, p. 444-459, 2008.

LAURINDO, J.B.; PELEG, M. Mechanical measurements in puffed rice cakes. **Journal of texture studies**, v. 38, n. 5, p. 619-634, 2007.

LI, Z. Design of a microcontroller-based, power control system for microwave drying. **Dissertação** (Mestrado em Bioresource Engineering) Department of Bioresource Engineering McGill University, Montreal, 2004.

LI, Z.; WANG, N.; RAGHAVAN, G. S. V.; CHENG, W. A microcontroller-based, feedback power control system for microwave drying processes. **Applied** LOUKA, N.; ALLAF, K. Expansion ratio and color improvement of dried vegetables texturized by a new process “controlled sudden decompression to the vacuum”: application to potatoes, carrots and onions. **Journal of food engineering**, v. 65, n. 2, p. 233-243, 2004.

MEREDITH, R. **Engineers' handbook of industrial microwave heating**. The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 1998.

MONTEIRO, R. L.; LINK, J. V.; TRIBUZI, G.; CARCIOFI, B. A.; LAURINDO, J. B. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. **Journal of Food Engineering**, v. 232, p. 1-10, 2018.

MONTEIRO, R.L., CARCIOFI, B.A.M., LAURINDO, J.B. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas. **Journal of Food Engineering**, v. 178, p. 1-11, 2016.

MONTEIRO, R.L.; CARCIOFI, B.A.M.; MARSAIOLI JR. A.; LAURINDO, J.B. How to make a microwave vacuum dryer with turntable. **Journal of Food Engineering**, v. 166, p. 276-284, 2015.

MOUSA, N.; FARID, M. Microwave vacuum drying of banana slices. **Drying Technology**, v. 20, n. 10, p. 2055-2066, 2002.



MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**, 3 ed., Florida: CRC/Taylor & Francis, 2006.

NELSON, S. O.; Dielectric properties of agricultural products—measurements and applications. **IEEE Trans. Electr. Insul.** 26 845–69, 1991.

NELSON, S. O.; TRABELSI, S. Influence of Water Content on RF and Microwave Dielectric Behavior of Foods. **Journal of Microwave Power and Eletromagnetic Energy**, Volume 43, 2008.

NELSON, S. O.; “Microwave Dielectric Properties of Fresh Fruits and Vegetables”, **Trans. ASAE**, Vol. 23, NO. 5, pp. 1314-1317, 1980.

NELSON, S. O.; TRABELSI, S. Principles of Microwave Moisture and Density Measurement in Grain and Seed. **Journal of Microwave Power and Eletromagnetic Energy**, Volume 39, 2004.

PUSCHNER, P. **The microwave processing of foods**. Cap. 14: Improving microwave process control. Editado por SCHUBERT, H.; REGIER, M. Flórida: CRC Press LLC, v.1, 2005.

RAHMAN, S. Food Properties Handbook. CRC Press. 2008. 128 ROOS, Y. Characterization of food polymers using state diagrams. **Journal of Food Engineering**. v. 24, p. 339–360, 1995.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. **Journal of food engineering**, v. 49, n. 4, p. 311-319, 2001.

RISMAN, P.O. Confined modes between a lossy slab load and a metal plane as determined by a waveguide trough model. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**, v. 29, n. 3, p. 161-170, 1994.

SCAMAN, C.H.; DURANCE, T.D. **Emerging Technologies for Food Processing**. Cap. 19: Combined Microwave Vacuum-drying. Editado por SUN, D. W. London: Elsevier Academic Press, 2014.

SCHUBERT, H.; REGIER M. **The Microwave Processing of Foods**. Cap.1 Introducing microwave processing of food: principles and technologies. Editado por SCHUBERT, H.; REGIER M. Florida: CRC Press. v.1, 2005.

SINGH, R.P.; HELDMAN, D.R. **Introduction to Food Engineering**. 4 ed., San Diego: Academic Press, 2009.

TANG, J. **The microwave processing of foods**. Cap. 2: Dielectric properties of foods. Editado por SHUBERT, H.; REGIER, M. Flórida: CRC Press LLC, v.1, 2005.

TANG, J.; FENG, H.; LAU, M. **Advances in bioprocessing engineering**. Cap 1: Microwave heating in food processing. Editado por YANG, X.H.; TANG, J. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., v.1, p.1-44, 2002.

THOSTENSON, E.T.; CHOU, T. W., 1999 **Microwave processing: fundamentals and applications**. Elsevier Science, New York.

TEIXEIRA, V. G.; COUTINHO, F. M. B. ; GOMES, A. S. Principais métodos de caracterização da porosidade de resinas à base de divinilbenzeno. **Química Nova**, vol.24, n.6 pp.808-818, 2001.

UBOLDI EIROA, M.N. Atividade de água: influência sobre o desenvolvimento de microrganismos e métodos de determinação em alimentos. **Boletim ITAL**, Campinas, v. 18, n. 3, p. 353-383, 1981.

WANG, N; BRENNAN, J. G. Moisture Sorption Isotherm Characteristics Potatoes at Four Temperatures. **Journal of Food Engineering**. Vol. 14, p. 269-287, 1991.

VAN ARSDEL, W.B., 1963. **Food Dehydration**. Vol. I. Principles. AVI Publishing Company, Inc., Westport, CT.

VÁSQUEZ, C.; DÍAZ-CALDERÓN, P.; ENRIONE, J.; MATIACEVICH, S. State diagram, sorption isotherm and color of blueberries as a function of water content. **Thermochimica Acta**. v. 570, p. 8-15, 2013.

VON HIPPEL, A. **Dielectrics and Waves**, New York: Wiley, 1954.

YANG, H.W.; GUNASEKARAN, S. Comparison of temperature distribution in model food cylinders based on Maxwell's equation and Lambert's law during pulsed microwave heating. **Journal of Food Engineering**, v. 64, n. 4, p. 445-453, 2004.

ZHANG, M.; TANG, J.; MUJUMDAR, A.S.; WANG, S. Trends in microwave-related drying

of fruits and vegetables. **Trends in Food Science & Technology**, v. 17, n. 10, p. 524-534, 2006.

ZHANG, H; DATTA, A.K.; **Handbook of Microwave Technology for Food Applications**. Cap. 2: Electromagnetics of Microwave Heating: Magnitude and Uniformity of Energy Absorption in an Oven. Editado por DATTA, A.K.; ANANTHESWARAN, R.C. New York: Marcel Dekker Inc., 2001.

ZIELINSKA, M.; MARKOWSKI, M. The influence of microwave-assisted drying techniques on the rehydration behavior of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). **Food chemistry**, v. 196, p. 1188-1196, 2016.

ZLOTORZYNSKI, A. The application of microwave radiation to analytical and environmental chemistry. **Critical Reviews in Analytical Chemistry**, v. 25, n. 1, p. 43-76, 1995.

ZOTARELLI, M. F., PORCIUNCULA, B. D. A., LAURINDO, J. B., A convective multi-flash drying process for producing dehydrated crispy fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 108, n. 4, p. 523-531, 2012.